

**DETERMINACIÓN DEL COEFICIENTE DE ENDURECIMIENTO POR
DEFORMACIÓN EN UNA ALEACIÓN DE ALUMINIO Y UN ACERO
ESTRUCTURAL ASTM A500**

**PAOLA ANDREA MÉNDEZ NAVARRO
VICTOR HUGO AGUILAR GONZALEZ**

**Proyecto integral de grado para optar al título de
INGENIERO MECÁNICO**

**Orientador:
DUBERNEY HINCAPIE LADINO
INGENIERO MECÁNICO**

**FUNDACIÓN UNIVERSIDAD DE AMÉRICA
FACULTAD DE INGENIERÍAS
PROGRAMA DE INGENIERÍA MECÁNICA
BOGOTÁ D.C**

2024

Nota de aceptación: _____

Bogotá D.C. Febrero de 2024

DIRECTIVAS DE LA UNIVERSIDAD

Presidente de la Universidad y Rector del Claustro

Dr. Mario Posada García-Peña

Consejero Institucional

Dr. Luis Jaime Posada García-Peña

Vicerrectora Académica

Dra. María Fernanda Vega de Mendoza

Vicerrectora de Investigaciones y de Extensión

Dra. Susan Margarita Benavides Trujillo

Vicerrector Administrativo y Financiero

Dr. Ricardo Alfonso Peñaranda Castro

Secretario General

Dr. José Luis Macías Rodríguez

Decano facultad de ingenierías

Dra. Naliny Patricia Guerra Prieto

Director del Programa de Ingeniería Mecánica

Dra. María Angélica Acosta Pérez

Las directivas de la Universidad América, los jurados calificadores y el cuerpo docente no son responsables por los criterios e ideas expuestas en el presente documento. Estos corresponden únicamente a los autores.

AGRADECIMIENTOS

Este trabajo ha sido posible gracias al apoyo y contribución de diversas personas, en primer lugar agradecemos a los profesores Edgar Chala y Rolando Soler por sus consejos para la realización de este trabajo; agradecemos al instrumentista Neider Alexander Castaño Ruiz del laboratorio de la universidad de América, por su colaboración en los ensayos de tracción y el corte de las placas de aluminio y acero; un sincero agradecimiento a cada una de las personas de la biblioteca de la universidad de América por brindar guía y damos gracias por las instalaciones y laboratorios puestos a disposición del trabajo con excelente gestión de la universidad América.

TABLA DE CONTENIDO

	Pág
RESUMEN	16
INTRODUCCIÓN	17
2. OBJETIVOS	19
2.1. Objetivo General	19
2.2. Objetivos Específicos	19
3. MARCO TEÓRICO	20
3.1. Curva Esfuerzo - Deformación en Aleaciones	20
3.2. Mecanismo De Deformación En Metales	28
3.3. El Coeficiente De Endurecimiento Por Deformación	33
3.4. Normas Para Ensayos De Tracción En Materiales Metálicos	39
3.5. Norma ASTM E646	45
3.6. El Acero ASTM A500	51
3.8. Aluminio Comercial	54
3.9. Coeficiente De Endurecimiento Por Deformación En El Acero ASTM A500 Y El Aluminio Comercial	56
4. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL	61
5. RESULTADOS	70
5.1 Ensayo metalográfico para el Acero ASTM A500	70
5.2 Ensayo metalográfico para la aleación de aluminio	71
5.3 Ensayos en el Acero ASTM A500	72
5.4 Resultados Ensayos Aleación De Aluminio	78
6. ANÁLISIS DE RESULTADOS	84
7. CONCLUSIONES	94
BIBLIOGRAFÍA	96
ANEXOS	100

LISTA DE TABLAS

	Pág.
Tabla 1. Exponentes del endurecimiento por deformación y coeficientes de resistencia de metales y aleaciones comunes.	36
Tabla 2. Ejemplos de datos ordenados obtenidos manualmente	49
Tabla 3. Tabla de resistencia del ASTM A500	50
Tabla 4. Composición química de los diferentes grados de acero	50
Tabla 5. Aleaciones comerciales de aluminio	52
Tabla 6. Coeficiente de endurecimiento por deformación de aleaciones de aluminio	55
Tabla 7. Tabla de datos de aleaciones de aluminio	55
Tabla 8. Propiedades mecánicas de algunas aleaciones de acero	56
Tabla 9. Propiedades Resultados de los ensayos en los distintos tipos de chapa.	57
Tabla 10. Tabla de datos obtenidos a partir de la curva de ingeniería para los ensayos de acero ASTM A500	73
Tabla 11. Tabla de datos necesarios para calcular el coeficiente de endurecimiento por deformación.	74
Tabla 12. Cálculos para la determinación del coeficiente de endurecimiento por deformación	75
Tabla 13. Coeficiente Valores del coeficiente de endurecimiento, constante de endurecimiento y desviación estándar de n.	75
Tabla 14. Tabla de datos obtenidos a partir de la curva de ingeniería para los ensayos de la aleación de aluminio comercial.	79

Tabla 15.	80
Tabla de datos necesarios para calcular el coeficiente de endurecimiento por deformación del aluminio.	
Tabla 16.	81
Cálculos para la determinación del coeficiente de endurecimiento por deformación	
Tabla 17.	81
Coeficiente Valores del coeficiente de endurecimiento, constante de endurecimiento y desviación estándar de n.	
Tabla 18.	85
Comparación de datos experimentales con literatura para el acero	
Tabla 19.	88
Comparación de datos experimentales con literatura para el aluminio	
Tabla 20.	110
Medición de la longitud inicial y final para cada probeta	
Tabla 21.	111
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el primer ensayo de tracción en acero ASTM A500	
Tabla 22.	112
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el primer ensayo de tracción en acero ASTM A500.	
Tabla 23.	113
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el segundo ensayo de tracción en acero ASTM A500.	
Tabla 24.	113
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el segundo ensayo de tracción en acero ASTM A500.	
Tabla 25.	114
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el tercer ensayo de tracción en acero ASTM A500.	
Tabla 26.	115
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el tercer ensayo de tracción en acero ASTM A500.	
Tabla 27.	116
Cálculos para la determinación del coeficiente n, la constante K y la desviación estándar de n para el cuarto ensayo de tracción en acero ASTM A500.	

Tabla 28.	116
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el cuarto ensayo de tracción en acero ASTM A500.	
Tabla 29.	117
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el quinto ensayo de tracción en acero ASTM A500.	
Tabla 30.	118
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el quinto ensayo de tracción en acero ASTM A500.	
Tabla 31.	119
Cálculos para la determinación del coeficiente n, la constante K y la desviación estándar de n para el sexto ensayo de tracción en acero ASTM A500.	
Tabla 32.	119
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el sexto ensayo de tracción en acero ASTM A500.	
Tabla 33.	120
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el séptimo ensayo de tracción en acero ASTM A500.	
Tabla 34.	121
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el séptimo ensayo de tracción en acero ASTM A500.	
Tabla 35.	122
Cálculos para la determinación del coeficiente n, la constante K y la desviación estándar de n para el octavo ensayo de tracción en acero ASTM A500.	
Tabla 36.	122
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el octavo ensayo de tracción en acero ASTM A500.	
Tabla 37.	130
Medición de la longitud final para cada probeta.	
Tabla 38.	132
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el primer ensayo de tracción en la aleación de aluminio comercial.	
Tabla 39.	132
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el primer ensayo de tracción en la aleación de aluminio.	

Tabla 40.	133
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el segundo ensayo de tracción en la aleación de aluminio comercial.	
Tabla 41.	134
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el segundo ensayo de tracción en la aleación de aluminio.	
Tabla 42.	135
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el tercer ensayo de tracción en la aleación de aluminio comercial	
Tabla 43.	135
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el tercer ensayo de tracción en la aleación de aluminio.	
Tabla 44.	136
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el cuarto ensayo de tracción en la aleación de aluminio comercial.	
Tabla 45.	137
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el cuarto ensayo de tracción en la aleación de aluminio.	
Tabla 46.	138
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el quinto ensayo de tracción en la aleación de aluminio comercial.	
Tabla 47.	138
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el quinto ensayo de tracción en la aleación de aluminio.	

LISTA DE FIGURAS

	pág.
Figura 1. Curva esfuerzo - deformación	26
Figura 2. Curva esfuerzo - deformación ingenieril y real	28
Figura 3. Diagramas esfuerzo - deformación de acero de bajo carbono y aluminio	29
Figura 4. Aparición de bandas de Lüders en una probeta ensayo de metal	30
Figura 5. Diagrama esfuerzo-deformación con bandas de Lüders	31
Figura 6. Evolución de la subestructura de un grano durante la deformación plástica	32
Figura 7. Movimiento de dislocaciones por cambios de posiciones atómicas	33
Figura 8. Movimiento de dislocaciones por arista asemejando el movimiento de una oruga	34
Figura 9. Movimiento de dislocaciones helicoidales	34
Figura 10. Dislocación mixta	35
Figura 11. Metal policristalino después de la deformación plástica	36
Figura 12. Curvas de esfuerzo deformación de un acero de bajo carbono sometido a trabajo en frío	37
Figura 13. Efecto de la deformación en frío sobre el esfuerzo de fluencia en aleaciones	38
Figura 14 Variación del n según deformación	39
Figura 15. Pendiente de la recta para metales en proceso de deformación	40

Figura 16.	43
Probeta convencional o estándar para ensayos	
Figura 17.	44
Probeta de carga tensión-pin la probeta con 50-mm [2-in.] longitud gage	
Figura 18.	45
Varios tipos de fines para los estándar de tensión ronda probetas	
Figura 19.	46
Probetas de gran diámetro tubular	
Figura 20.	46
Muestra de probeta de ensayo estándar para la tensión de hierro maleable	
Figura 21.	49
Probetas de ensayo esfuerzo deformación ASTM E646-16	
Figura 22.	50
Pares de datos obtenidos de la curva de esfuerzo - deformación con fluencia discontinua	
Figura 23.	51
Pares De Datos Obtenidos De La Curva De Esfuerzo - Deformación Sin Fluencia Discontinua	
Figura 24.	56
Muestra metalográfica de un acero ASTM A500	
Figura 25.	58
Muestra metalográfica de una aleación de aluminio	
Figura 26.	63
Comportamiento del coeficiente de endurecimiento por deformación en diferentes temperaturas	
Figura 27.	64
Perfil de acero A500	
Figura 28.	65
Perfil de una aleación de aluminio	
Figura 29.	67
Elaboración de las probetas en Solid Edge para acero.	
Figura 30.	67
Elaboración de las probetas en Solid Edge para aluminio.	
Figura 31.	68
Cortes de las placas de acero y aluminio en láser.	

Figura 32.	69
Probetas de ensayo de aluminio comercial y acero A500	
Figura 33.	70
Probetas de ensayo de aluminio comercial y acero A500 con la zona de elongación demarcada.	
Figura 34.	73
Muestras de las probetas usadas en el laboratorio para el estudio del acero ASTM A500.	
Figura 35.	74
Imagen de la metalografía para el acero ASTM A500	
Figura 36.	74
Muestras de probetas usadas en el laboratorio para una aleación de aluminio	
Figura 37.	75
Imagen de la metalografía para la aleación de aluminio	
Figura 38.	76
Curva fuerza - desplazamiento de la prueba de acero ASTM 500	
Figura 39.	76
Curva esfuerzo-deformación ingenieril de la cuarta prueba de acero ASTM 500	
Figura 40.	77
Curva esfuerzo-deformación real de la cuarta prueba de acero ASTM 500	
Figura 41.	77
Curva esfuerzo-deformación ingenieril y real de la cuarta prueba de acero ASTM 500	
Figura 42.	79
Selección de datos de la curva esfuerzo - deformación para un ensayo del acero ASTM A500	
Figura 43.	81
Curva fuerza - desplazamiento de la prueba de aleación de aluminio comercial	
Figura 44.	82
Curva esfuerzo - deformación de la prueba de aleación de aluminio comercial	
Figura 45.	82
Curva esfuerzo - deformación real de la prueba de aleación de aluminio comercial	
Figura 46.	83
Curva esfuerzo-deformación ingenieril y real de la segunda prueba de aleación de aluminio comercial	
Figura 47.	85
Curva esfuerzo-deformación, con la selección de datos.	

Figura 48.	88
Microestructura de aleación de aluminio perteneciente al grupo de los 6XXX.	
Figura 49.	88
Microestructura de aleación de aluminio perteneciente al grupo de los 1XXX.	
Figura 50.	91
Probetas de acero ASTM A500 después de la fractura.	
Figura 51.	91
Probeta de acero ASTM A500 después de la fractura.	
Figura 52.	94
Probetas de la aleación de aluminio estructural después de la fractura.	
Figura 53.	94
Probeta de la aleación de aluminio estructural después de la fractura.	
Figura 54.	103
Curva fuerza - desplazamiento para la primera prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 55.	104
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la primera prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 56.	104
Curva esfuerzo - deformación real para la primera prueba de tracción en acero ASTM 500.	
Figura 57.	105
Curva fuerza - desplazamiento para la segunda prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 58.	105
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la segunda prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 59.	106
Curva esfuerzo - deformación real para la segunda prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 60.	106
Curva fuerza - desplazamiento para la tercera prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 61.	107
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la tercera prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 62.	107
Curva esfuerzo - deformación real para la tercera prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 63.	108
Curva fuerza - desplazamiento para la cuarta prueba de tracción en acero ASTM A500.	

Figura 64.	108
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la cuarta prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 65.	109
Curva esfuerzo - deformación real para la cuarta prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 66.	109
Curva fuerza - desplazamiento para la quinta prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 67.	110
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la quinta prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 68.	110
Curva esfuerzo - deformación real para la quinta prueba de tracción en acero ASTM A500.	
110	
Figura 69.	111
Curva fuerza - desplazamiento para la sexta prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 70.	111
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la sexta prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 71.	112
Curva esfuerzo - deformación real para la sexta prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 72.	112
Curva fuerza - desplazamiento para la séptima prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 73.	113
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la séptima prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 74.	113
Curva esfuerzo - deformación real para la séptima prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 75.	114
Curva fuerza - desplazamiento para la octava prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 76.	114
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la octava prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 77.	115
Curva esfuerzo - deformación real para la octava prueba de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 78.	116
Selección de pares de datos para el primer ensayo de tracción en acero ASTM A500	

Figura 79.	117
Selección de pares de datos para el segundo ensayo de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 80.	119
Selección de pares de datos para el tercer ensayo de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 81.	120
Selección de pares de datos para el cuarto ensayo de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 82.	122
Selección de pares de datos para el quinto ensayo de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 83.	123
Selección de pares de datos para el sexto ensayo de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 84.	125
Selección de pares de datos para el séptimo ensayo de tracción en acero ASTM A500	
Figura 85.	126
Selección de pares de datos para el octavo ensayo de tracción en acero ASTM A500.	
Figura 86.	128
Curva fuerza - desplazamiento para la primera prueba de tracción en la aleación de aluminio.	
Figura 87.	128
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la primera prueba de tracción en una aleación de aluminio.	
Figura 88.	129
Curva esfuerzo - deformación real para la primera prueba de tracción en la aleación de aluminio.	
Figura 89.	129
Curva fuerza - desplazamiento para la segunda prueba de tracción en una aleación de aluminio.	
Figura 90.	130
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la segunda prueba de tracción en una aleación de aluminio.	
Figura 91.	130
Curva esfuerzo - deformación real para la segunda prueba de tracción en una aleación de aluminio.	
Figura 92.	131
Curva fuerza - desplazamiento para la tercera prueba de tracción en una aleación de aluminio.	

Figura 93.	131
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la tercera prueba de tracción en una aleación de aluminio.	
Figura 94.	132
Curva esfuerzo - deformación real para la tercera prueba de tracción en una aleación de aluminio.	
Figura 95.	132
Curva fuerza - desplazamiento para la cuarta prueba de tracción en una aleación de aluminio.	
Figura 96.	133
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la cuarta prueba de tracción en una aleación de aluminio.	
Figura 97.	133
Curva esfuerzo - deformación real para la cuarta prueba de tracción en una aleación de aluminio.	
Figura 98.	134
Curva fuerza - desplazamiento para la quinta prueba de tracción en una aleación de aluminio.	
Figura 99.	134
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la quinta prueba de tracción en una aleación de aluminio.	
Figura 100.	135
Curva esfuerzo - deformación real para la quinta prueba de tracción en una aleación de aluminio.	
Figura 101.	136
Selección de pares de datos para el primer ensayo de tracción en la aleación de aluminio comercial.	
Figura 102.	138
Selección de pares de datos para el segundo ensayo de tracción en la aleación de aluminio comercial.	
Figura 103.	139
Selección de pares de datos para el tercer ensayo de tracción en la aleación de aluminio comercial.	
Figura 104.	141
Selección de pares de datos para el cuarto ensayo de tracción en la aleación de aluminio comercial.	

Figura 105.	142
Selección de pares de datos para el quinto ensayo de tracción en la aleación de aluminio comercial.	
Figura 106.	144
Probeta fracturada del primer ensayo de tracción.	
Figura 107.	144
Probeta fracturada del segundo ensayo de tracción.	
Figura 108.	145
Probeta fracturada del tercer ensayo de tracción.	
Figura 109.	145
Probeta fracturada del cuarto ensayo de tracción.	
Figura 110.	146
Probeta fracturada del quinto ensayo de tracción.	
Figura 111.	146
Probeta fracturada del sexto ensayo de tracción.	
Figura 112.	147
Probeta fracturada del séptimo ensayo de tracción.	
Figura 113.	147
Probeta fracturada del octavo ensayo de tracción.	
Figura 114.	148
Probeta fracturada del primer ensayo de tracción.	
Figura 115.	148
Probeta fracturada del segundo ensayo de tracción.	
Figura 116.	149
Probeta fracturada del tercer ensayo de tracción.	
Figura 117.	149
Probeta fracturada del cuarto ensayo de tracción.	
Figura 118.	150
Probeta fracturada del quinto ensayo de tracción.	
Figura 119.	151
Parámetros del sistema o tipo de ensayo.	
Figura 120.	151
Parámetros del sensor de unidades de medida.	
Figura 121.	152
Parámetros del ensayo en tipo de gráfico.	

Figura 122.	152
Parámetros de la probeta o muestra aleación de aluminio.	
Figura 123.	153
Parámetros de la probeta o muestra acero ASTM A500.	
Figura 124.	153
Parámetros de procesamiento de los datos.	
Figura 125.	154
Parámetros de ejes coordenados.	
Figura 126.	154
Informe final de la máquina.	

RESUMEN

Este proyecto tiene como objetivo la determinación del coeficiente de endurecimiento por deformación para dos materiales, una aleación de aluminio comercial y un acero ASTM A500, esto por medio de ensayos de tracción en una máquina universal de ensayos. Para lograr obtener los cálculos necesarios para determinar el parámetro se hizo estudio de la norma ASTM E 646 junto con la norma ASTM E8 y varios conceptos necesarios para desarrollar el proyecto. Los ensayos se desarrollaron en los laboratorios de la universidad de América, con ayuda de una máquina universal de ensayos, se obtuvieron los valores de fuerza y desplazamiento de las probetas de ensayo de aluminio comercial y acero ASTM A500. Se llevaron a cabo trece ensayos, ocho para el acero y cinco para el aluminio, cuyos resultados fueron analizados a partir de la construcción de las curvas de esfuerzo deformación de ingenieril y real, utilizando las recomendaciones de la norma ASTM E 646 se calculó el valor de n , utilizando las ecuaciones recomendadas. Con los valores obtenidos del coeficiente de endurecimiento por deformación, se pudo realizar la comparación entre los materiales estudiados y los valores consultados en las diferentes bibliografías, se encontró que los resultados para el acero presentan concordancia con la literatura, por otro lado los resultados para el aluminio fueron altos cuando comparados con los de la literatura especializada. La realización de este trabajo permitió aplicar las recomendaciones de la norma ASTM en ensayos realizados en la universidad de América, los valores obtenidos en este proyecto se encuentran dentro de los rangos presentados en la literatura especializada, para los datos del aluminio se requieren más ensayos para llegar a una mejor conclusión.

Palabras clave: Coeficiente de Endurecimiento, Acero Estructural, Aleación de Aluminio, Ensayos de Tracción.

INTRODUCCIÓN

La industria de los materiales estructurales necesita cada vez más mejoras en los procesos de conformación los cuales llevan a mejorar las propiedades mecánicas de los productos, las investigaciones alrededor del tema han dado a conocer que se pueden llegar a encontrar fallas como grietas, deformaciones no deseadas, porosidades, fatiga y distorsiones durante el proceso de conformado [1], por el efecto de las fuerzas aplicadas, como las tensiones residuales, fatiga en el material, inestabilidades, entre otros [2]. Para el aumento de las propiedades mecánicas de los materiales trabajados en frío, se deben tener en cuenta una serie de parámetros relacionados con el proceso de fabricación y las características de la aleación [3]. En diferentes aplicaciones como, la industria aeroespacial, fabricación de turbinas, laminación de metales, aplicaciones automotrices, construcción de estructuras como edificios y puentes, se desarrollan nuevos materiales de ingeniería, entre ellos aleaciones, con propiedades no determinadas, para lo cual los materiales requieren ser caracterizados mecánicamente, para así poder determinar su comportamiento, lo cual permite mejorar su uso y encontrar nuevas aplicaciones para dichas aleaciones [4].

El endurecimiento por deformación es uno de los procesos industriales más usados, tiene como objetivo endurecer un material o aleación que no responde a un tratamiento térmico [5], este tipo de endurecimiento se produce cuando el material gana resistencia mecánica luego de pasar la deformación plástica [6], esta deformación es generada por una fuerza aplicada al material, aumentando la cantidad o densidad las dislocaciones de la estructura del material [6], lo que provoca interferencia para el movimiento de las dislocaciones. Una característica del material que debe ser tomada en cuenta para llevar a cabo un trabajo en frío es el coeficiente de endurecimiento por deformación, el cual nos permite predecir el comportamiento mecánico de los materiales después de los procesos de conformado en frío [5]. Determinar la respuesta del material bajo deformación plástica es un parámetro importante para la caracterización del comportamiento mecánico del material, dado que conociendo este valor podemos realizar

cálculos que permitan predecir sus propiedades mecánicas luego de realizar el conformado en frío [5].

El aluminio y el acero estructural son materiales utilizados para la fabricación de estructuras, el aluminio es usado para estructura arquitectónica que soporta bajas cargas de trabajo y los aceros estructurales se utilizan en casos donde se deben soportar esfuerzos mayores, uno de los mecanismos para aumentar su resistencia es la deformación plástica, por este motivo la determinación del coeficiente de endurecimiento por deformación se hace relevante para este tipo de aleaciones.

El objetivo de este trabajo de grado es la determinación del coeficiente de endurecimiento por deformación de una aleación comercial de aluminio y un acero estructural ASTM A500, realizando la comparación entre los resultados experimentales obtenidos y los consultados en la literatura especializada. La determinación experimental se realizará en los laboratorios de la universidad América. A partir de muestras planas de aluminio y acero estructural se fabricarán probetas bajo la norma ASTM E646, con los resultados experimentales se harán los cálculos recomendados de la norma para determinar el coeficiente de endurecimiento por deformación de las dos aleaciones estudiadas, lo cual permitirá establecer y comparar los datos obtenidos.

2. OBJETIVOS

2.1. Objetivo General

Determinar experimentalmente el coeficiente de endurecimiento por deformación de una aleación comercial de aluminio y un acero estructural ASTM A500 Grado C, realizando la comparación de los resultados experimentales obtenidos.

2.2. Objetivos Específicos

Realizar la consulta bibliográfica de los métodos para la determinación del coeficiente de endurecimiento en diferentes aleaciones, seleccionar la probeta más adecuada para las pruebas y el número de ensayos a realizar.

Realizar pruebas en una máquina universal de ensayos disponibles en los laboratorios de la Universidad de América, para obtener el coeficiente de endurecimiento por deformación de las aleaciones estudiadas.

Analizar los datos obtenidos en los experimentos, calculando los valores del coeficiente de endurecimiento por deformación para cada una de las aleaciones estudiadas.

3. MARCO TEÓRICO

3.1. Curva Esfuerzo - Deformación en Aleaciones

La curva de tensión - deformación es una herramienta fundamental para la comprensión del comportamiento de los materiales bajo diferentes tipos de esfuerzos, que ayuda a determinar varias propiedades que son importantes para el diseño de estructuras y elementos de máquina [6]. La curva esfuerzo - deformación ingenieril, se basa en datos obtenidos por métodos experimentales y se considera el área transversal de la probeta constante durante toda la prueba. Para calcular el esfuerzo ingenieril es utilizada la ecuación 1:

$$\sigma = \frac{F}{A_0} \quad \text{Ecuación 1}$$

Donde A_0 es el área inicial de la sección transversal, considerada constante durante todo el ensayo y F la fuerza aplicada. La ecuación 2 se usa para calcular la deformación ingenieril:

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l_0} \quad \text{Ecuación 2}$$

Donde l_0 es la longitud inicial y Δl es la diferencia de la longitud (Alargamiento) después de aplicada la fuerza. En las pruebas experimentales a un probeta se le aplica carga y se mide la deformación provocada, cuando son graficados los datos, con el esfuerzo en la ordenada y la deformación de ingeniería en la abscisa, esta gráfica se conoce como esfuerzo - deformación de ingeniería. Esta curva presenta tres regiones características como se presenta en la Figura 1. La región elástica, es la primera etapa por la que pasa el material en un ensayo de tensión, al momento de dar inicio a la prueba se aplican las cargas sobre la probeta, esto genera una deformación, si el material está en esta etapa y es removida la carga, la probeta volverá a sus dimensiones iniciales, es decir no produce una deformación permanente [7], esta región es

modelada por la ley de Hooke, es decir el comportamiento es elástico, como se presenta en la ecuación 3.

$$\sigma = E\varepsilon \quad \text{Ecuación 3}$$

Donde σ es el esfuerzo normal y ε la deformación unitaria y E el módulo de Young (módulo de elasticidad), el cual es la pendiente de la curva en la región elástica y se calcula a partir de los datos experimentales según la ecuación 4 .

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon} \quad \text{Ecuación 4}$$

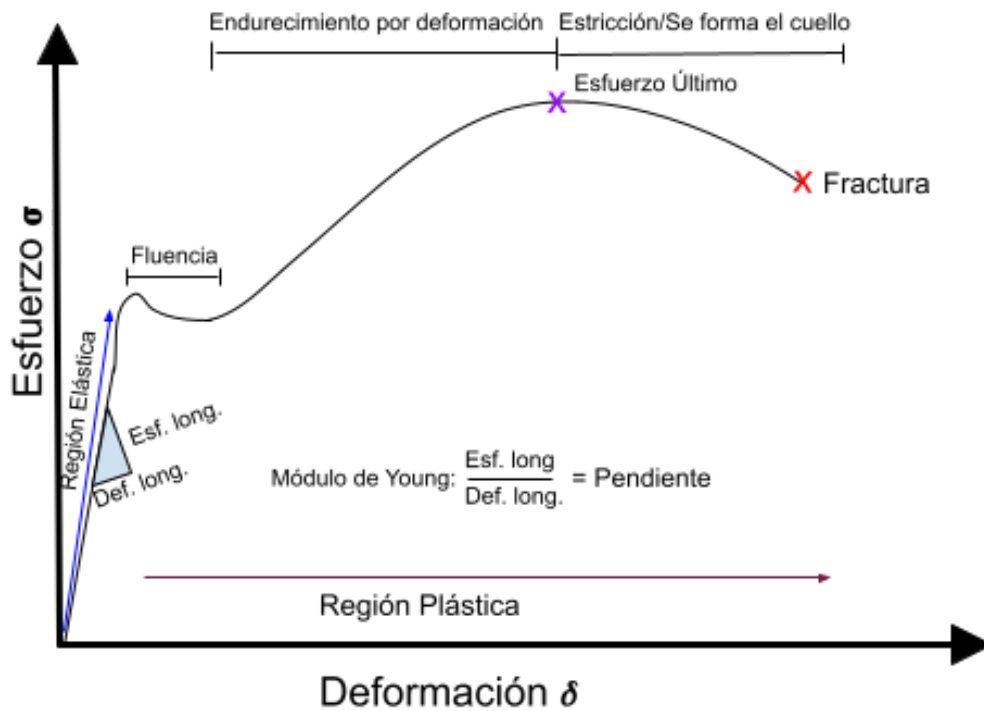
La siguiente es la región plástica, donde la deformación es permanente, es decir que cuando se retira la carga el material no volverá a sus dimensiones originales y la ley de Hooke ya no es válida, por tanto cuando la carga se retira la muestra continua deformada ($\varepsilon \neq 0$), el comportamiento plástico del material no solo depende del esfuerzo aplicado, sino también, del tiempo que transcurre antes de remover la carga, por eso se hace relevante la velocidad en la cual se realiza el ensayo [8].

La deformación permanente incluye la zona de fluencia o cedencia (Figura 1), que es donde se inicia el comportamiento plástico, dado por el movimiento de dislocaciones, para algunos materiales como aceros de bajo carbono o laminados el esfuerzo es fluctuante con algunos picos, formando escalones en la gráfica. Otras aleaciones no presentan un esfuerzo de cedencia bien definido (escalón), por ejemplo el aluminio tiene una curva con un aumento progresivo saliéndose de la linealidad, donde este punto se determina gráficamente aplicando el método de corrimiento o método del 0,2% [9]. Después de la región de fluencia, se inicia el endurecimiento por deformación o deformación uniforme (Figura 1) y termina cuando el material llega al esfuerzo último [9], en esta región el material gana resistencia mecánica [6]. Después del

esfuerzo último inicia la región de estricción o de deformación no uniforme, los metales dúctiles son los que experimentan este comportamiento de manera más visible, ésta es provocada por la disminución del área de la sección transversal del material de forma localizada, lo que genera el llamado *necking* o estricción, aumentando el esfuerzo en este punto y es el lugar donde se genera la fractura final [9].

Figura 1.

Curva esfuerzo - deformación



Nota. Curva Esfuerzo - Deformación presentando las principales regiones. Tomada de: KDM Fabrication, Metal Strength Chart: The Ultimate Guide, Key Parameters Of Metal Strength Chart. <https://kdmfab.com/metal-strength-chart/>.

Para determinar la curva esfuerzo - deformación de un material se deben realizar ensayos de tensión diseñados para medir como el material responde a las cargas aplicadas, la curva esfuerzo deformación, muestra el esfuerzo en el eje vertical y la deformación unitaria en abscisa [8]. Los diagramas varían entre ensayos, ya que dependen de la temperatura y la velocidad en la que se aplica la fuerza, mostrando diferentes valores para el mismo material dependiendo de las condiciones de ensayo [8], dadas la variaciones que se pueden presentar, existen estándares como la norma ASTM E8 [10], la cual hace referencia a el procedimiento que debe ser llevado a cabo para obtener información estandarizada de las propiedades mecánicas para diferentes metales. Esta norma además de dar el paso a paso de la realización del ensayo de tracción, presenta la geometría de las probetas a usar, dependiendo de su tipo, grosor y agarre de la máquina.

Se pueden obtener dos curvas de esfuerzo - deformación a partir de los ensayos de tensión. En primer lugar tenemos la curva esfuerzo - deformación ingenieril, esta se basa en mediciones directas tomadas durante un ensayo de tracción [11]. Esto representa cómo el material se comporta bajo cargas de tensión a medida que la probeta se deforma en condiciones establecidas. Esta curva no toma en cuenta el cambio de área que se presenta a medida que la muestra se va deformando, es por esto que cuando empieza la formación del cuello el valor del esfuerzo disminuye y la curva baja, lo cual no tiene sentido si tenemos en cuenta que el esfuerzo aplicado en la probeta siempre es creciente [8], sin embargo, el error es pequeño cuando se aplican los parámetros obtenidos en esta curva para condiciones de diseño mecánico. El esfuerzo ingenieril es dado por la Ecuación 1 [9].

También se puede determinar la curva esfuerzo - deformación real, donde el cálculo del esfuerzo depende del cambio del área, es decir, toma en cuenta la diferencia de área durante la formación del cuello que lleva a la fractura, el valor de esfuerzo sigue aumentando a medida que es aplicada la carga y la curva sigue incrementándose debido a la disminución en el área, por este motivo es considerado como esfuerzo verdadero. Para determinar el esfuerzo real se usa la Ecuación 5 [9].

$$\sigma = \frac{F}{A_i} \text{ Ecuación 5}$$

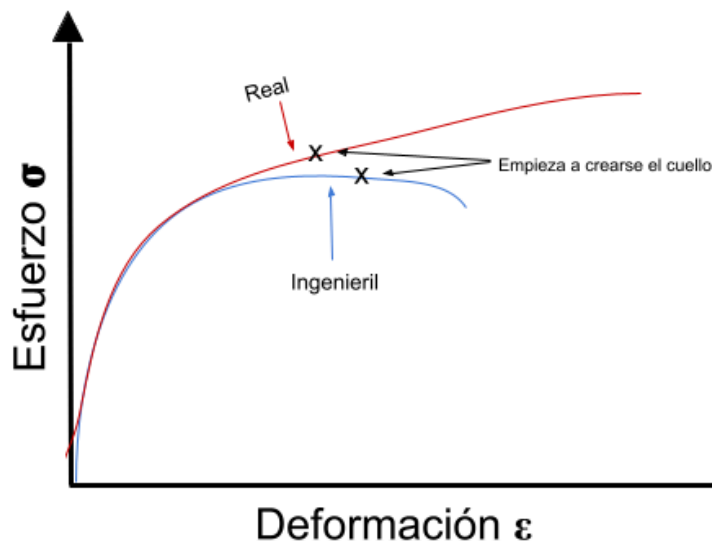
Donde σ es el esfuerzo, F es la fuerza aplicada y A_i el área donde la deformación está ocurriendo, para calcular la deformación real se usa la ecuación 6.

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{l_i}{l_0}\right) \text{ Ecuación 6}$$

Donde ε es la deformación, l_0 es la longitud inicial de la probeta, l_i es la longitud instantánea [6]. La diferencia entre la curva ingenieril y la real se puede observar en la Figura 2, donde se muestra el punto del esfuerzo último, el cual es diferente en ambas curvas. El valor de esfuerzo máximo que es generalmente usado como referencia en el proceso de diseño, es el de la curva ingenieril ya que es directamente determinado de los datos generados por la máquina de ensayos sin necesidad de aplicar las ecuaciones para la curva real [6].

Figura 2.

Curva esfuerzo - deformación ingenieril y real

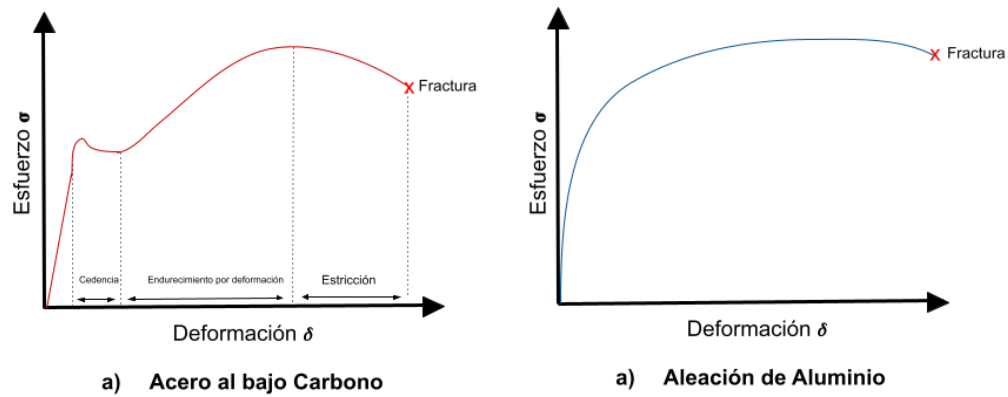


Nota. Curvas de Esfuerzo - Deformación ingenieril y real [11]. Tomada de: Autores, Askeland, D. R., & Fulay, P. P. (2011). Ciencia e ingeniería de materiales, 6ta edición. Cengage Learning. Cap.6-5 esfuerzo - deformación unitaria.

El comportamiento de cada material en la curva de esfuerzo - deformación es diferente, como se puede observar en la Figura 3, por ejemplo, los materiales ferrosos con bajo contenido de carbono presentan resultados distintivos en los ensayos de tensión, debido a su composición química, dado que se encuentran átomos intersticiales de carbono [12], los que provocan que este tipo de material presenten el fenómeno de punto de fluencia, es decir un punto de fluencia superior e inferior al final de la zona elástica [11]. Para los aceros bajos en carbono el movimiento de las dislocaciones no es constante por la interferencias en el proceso de desplazamiento causadas por los átomos intersticiales, lo que requiere un mayor esfuerzo cortante para superar la barrera de átomos de C que se encuentra en el camino y es por esto que la curva de esfuerzo-deformación de los acero de bajo carbono tiene una punto superior de fluencia, provocado por el esfuerzo adicional para generar el deslizamiento. Por otro lado, el aluminio ya presenta una transición no tan definida entre la zona elástica y plástica, pero sigue siendo observable en este material a pesar de que su estructura cristalina cúbica centrada en las caras no provocan el fenómeno de punto de fluencia [12]. En la figura 3 se presenta la comparación de dos curvas típicas esfuerzo-deformación, para materiales como el aluminio la resistencia a la fluencia por lo general se define a partir de la deformación compensada a 0.2% [11].

Figura 3.

Diagramas esfuerzo - deformación de acero de bajo carbono y aluminio

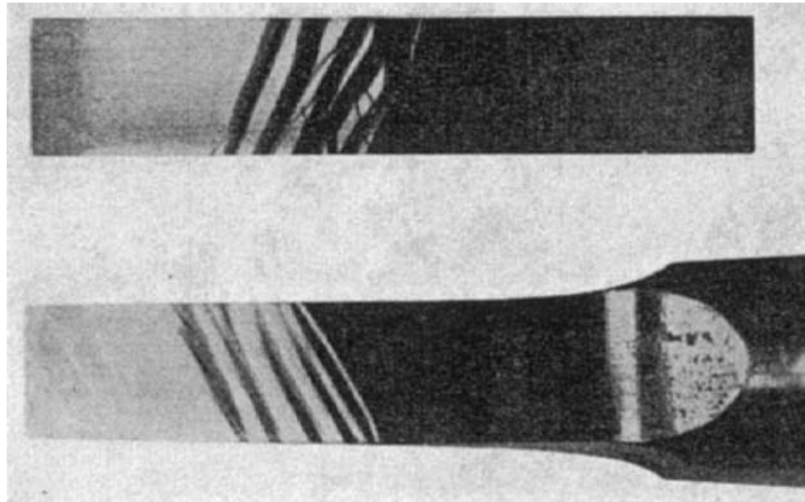


Nota. Diagramas comparando la curva de esfuerzo - deformación de un acero al bajo Carbono y una aleación de Aluminio[8]. Tomado de: P. Beer, Ferdinand; Johnston, Jr., E. Russell; DeWolf, John T., Mazurek, David F. (2013) Mecanica de Materiales, 6ta edición. Mc GRAW-HILL INTERAMERICANA EDITORES, S.A. Cap. 2.3 Diagrama esfuerzo - deformación.

En la curva esfuerzo deformación que presenta el fenómeno de punto de fluencia (Figura 3 a), cuando ocurre la transición de la deformación elástica a la plástica se produce un fenómeno visible de deformación no uniforme, este tipo de deformación no homogénea a veces se denomina efecto Piobert, deformación de Lüders o deformación plástica local. Las bandas de Lüders también conocidas como *Lüders lines*, son líneas características que aparecen en muestras de algunas aleaciones cuando son sometidas a tracción uniaxial, estas bandas son regiones de deformación plástica localizada con apariencia de líneas o bandas onduladas en la superficie del material, como se observa en la Figura 4 [1].

Figura 4.

Aparición de bandas de Lüders en una probeta ensayo de metal

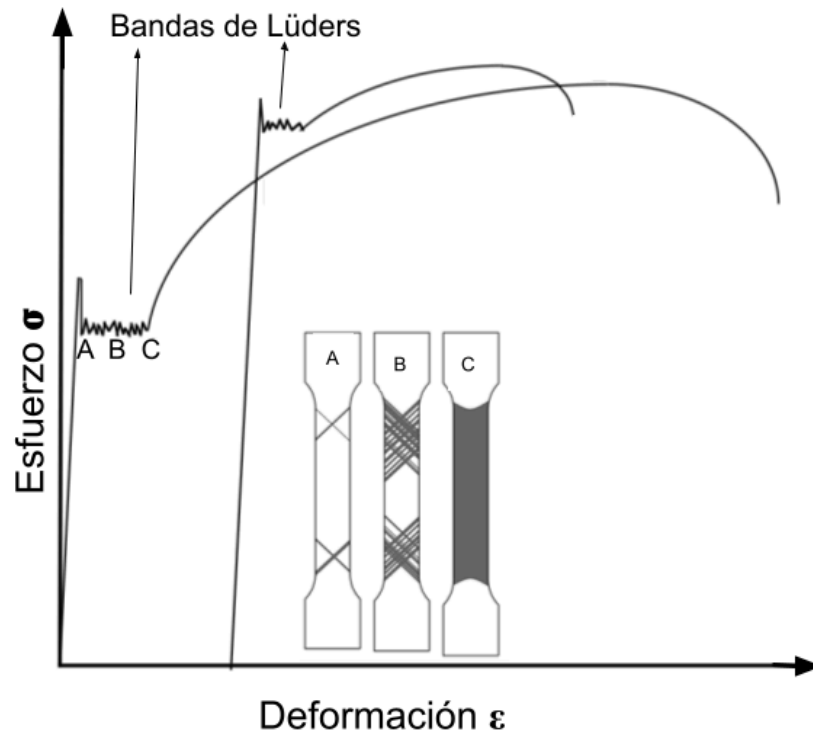


Nota. Imagen de probeta de acero de bajo carbono con líneas de Lüders después del ensayo de tracción [1]. Tomado de: Libro de Hosford, William F., Caddell, Robert M., (2011). Metal Forming: Mechanics and Metallurgy, 4th Edition, Cambridge University Press, USA.

La aparición de estas bandas es provocada por una redistribución de las dislocaciones del material, haciendo que se muevan y se multipliquen resultando en líneas que provocan una deformación plástica localizada, generando cambios notorios en la superficie y forma del material. Normalmente aparecen después de la región elástica y antes del inicio de la deformación uniforme, estas indican la transición de la región elástica a la plástica y solo cuando atraviesan toda la probeta ocurre el endurecimiento por deformación, se considera que cada oscilación de la curva en la región del límite elástico inferior, indica un alargamiento como resultado de la nucleación de una nueva banda de Lüders [1], como mostrado en la Figura 5.

Figura 5.

Diagrama esfuerzo-deformación con bandas de Lüders



Nota. Diagrama esfuerzo-deformación de un metal de bajo carbono haciendo énfasis en las bandas de Lüders [1]. Tomado de: Libro de Hosford, William F., Caddell, Robert M., (2011). Metal Forming: Mechanics and Metallurgy, 4th Edition, Cambridge University Press, USA.

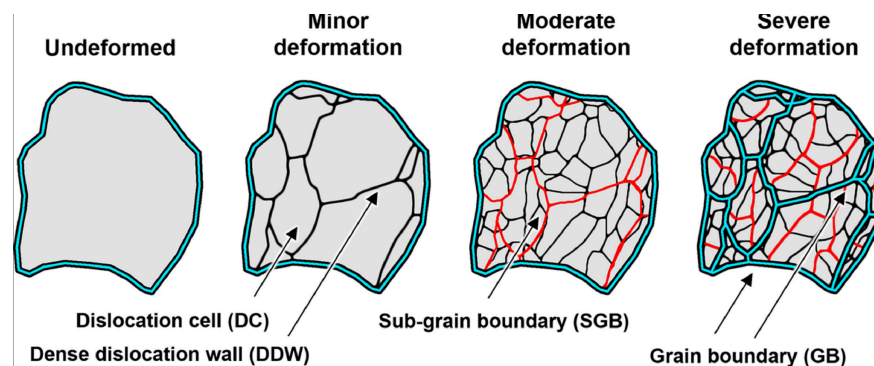
3.2. Mecanismo De Deformación En Metales

La deformación plástica en un material involucra el desplazamiento de átomos, provocado por una fuerza cortante aplicada, que provoca el deslizamiento de defectos cristalinos llamados dislocaciones, estos defectos son los que permiten que el policristal se deforme de manera permanente sin fracturarse si tienen un deslizamiento continuo, de lo contrario si se agrupan o acumulan, el material tenderá a tener cambios significativos en las propiedades mecánicas.

Comprender el mecanismo de deformación y endurecimiento por el movimiento de dislocaciones, permitirá conocer las propiedades mecánicas de acuerdo a las condiciones de deformación [6]. El movimiento de las dislocaciones conocido como deslizamiento es provocado por una tensión o carga, esto genera la deformación plástica en un material sólido cristalino, entre más se deforma un material mayor cantidad de dislocaciones serán creadas como se observa en la Figura 6 [13], lo que lo hace un mecanismo importante para el manejo de las propiedades de los materiales, las dislocaciones se deslizan en los planos y direcciones más compactas y como se observa en la Figura 7 se trasladan mientras se hacen los cambios de posiciones atómicas en respuesta al esfuerzo cortante aplicado [6].

Figura 6.

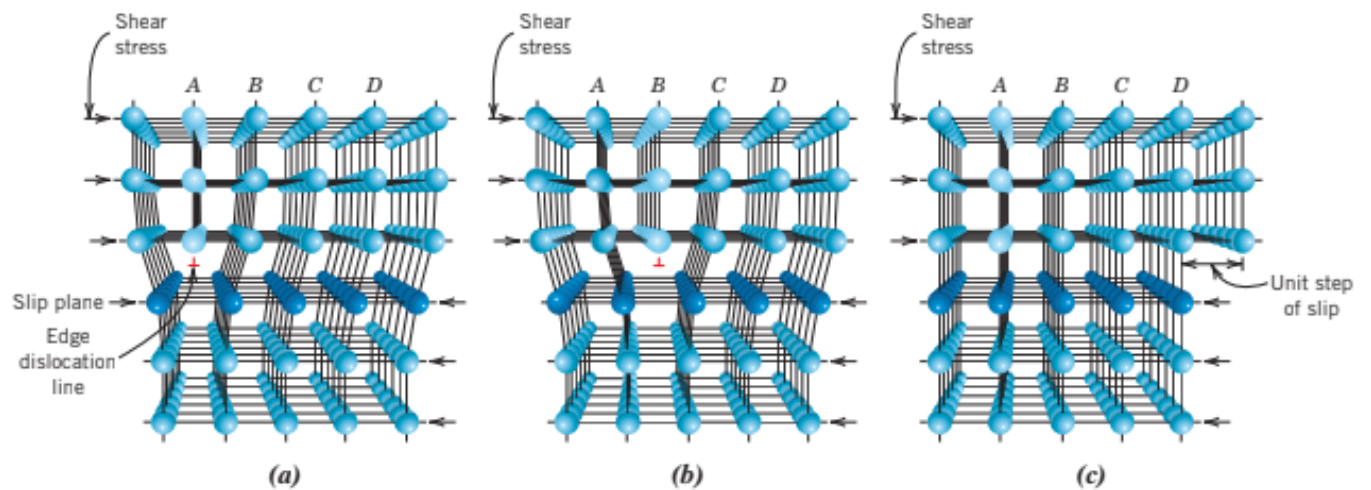
Evolución de la subestructura de un grano durante la deformación plástica



Nota. Evolución de la subestructura de un grano durante la deformación plástica mostrando los límites de grano. Tomado de: Lehto, P. (2021). Adaptive domain misorientation approach for the EBSD measurement of deformation induced dislocation sub-structures. Volumen 222 [13].

Figura 7.

Movimiento de dislocaciones por cambios de posiciones atómicas



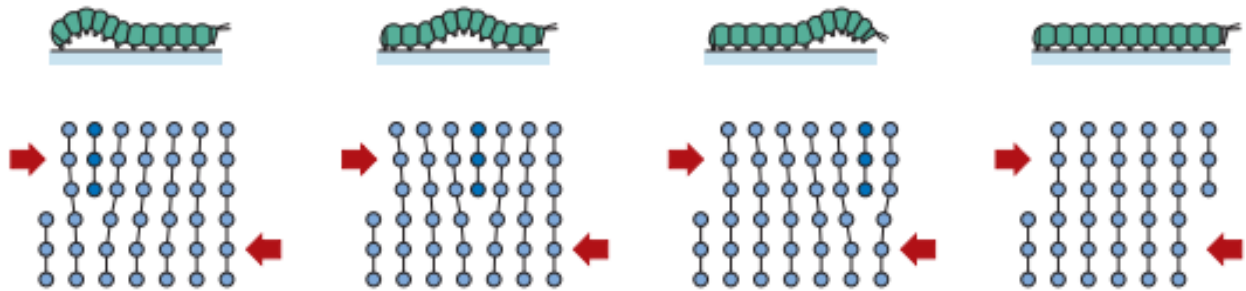
Nota. Esquema mostrando el movimiento de las dislocaciones en cuña. Tomado de: Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. John Wiley & Sons. 10th Edition. Chapter 7 [6].

En el mecanismo de deformación por deslizamiento existen dos tipos fundamentales de dislocaciones, las dislocaciones de borde también conocidas como dislocaciones de arista o cuña y las dislocaciones helicoidales o de tornillo, en algunos casos estos dos tipos de dislocaciones se mezclan creando dislocaciones mixtas. El tipo de dislocación que se genere en el material depende de varios factores, como lo son la estructura cristalina, las condiciones en las que la deformación se está generando, esfuerzo aplicado y cantidad de impurezas [6].

Las dislocaciones de borde son defectos lineales presentes en la estructura cristalina del material, son las más comunes que se presentan en los materiales al momento de aplicar un esfuerzo, el movimiento de la dislocación es ondulado como se ve en la Figura 8, en la literatura se explica cómo el movimiento de una oruga [14], creando una línea de defecto que se extiende a lo largo del plano de forma perpendicular al sentido de la dirección de deslizamiento, permitiendo la deformación plástica [6].

Figura 8.

Movimiento de dislocaciones por arista asemejando el movimiento de una oruga

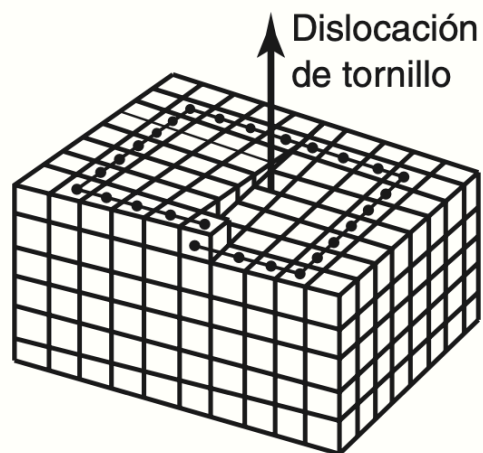


Nota. Representación del movimiento de una dislocación de borde en analogía al movimiento de una oruga. Tomado de: Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. John Wiley & Sons. 10th Edition. Chapter 7 [6].

Por otra parte, las dislocaciones helicoidales tienen forma de hélice o espiral en la estructura cristalina del material, no son tan comunes como las dislocaciones de borde y no tienen una dirección única, sino que son guiadas alrededor de un eje [11]. En la Figura 9 se muestra una representación de la dislocación de tornillo [11].

Figura 9.

Movimiento de dislocaciones helicoidales

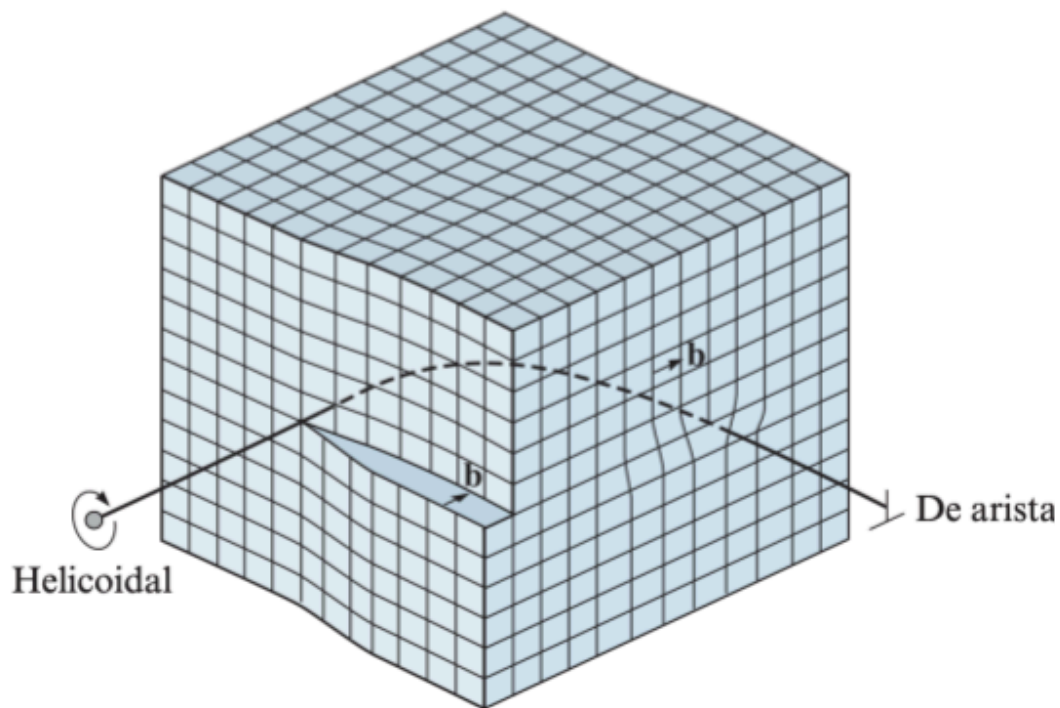


Nota. Representación de una dislocación helicoidal. Tomado de: Kalakjian S., Schmid S. R. (2008) *Manufactura, ingeniería y tecnología*, Quinta edición. PEARSON EDUCACIÓN, México [14].

Un tipo especial de dislocación son las dislocaciones mixtas, estas tienen componentes de los dos tipos de dislocaciones anteriormente mencionados con una región de transición, tienen incluido un componente de deslizamiento como las dislocaciones de borde y un componente de torsión como las dislocaciones helicoidales como se observa en la Figura 10 [11].

Figura 10.

Dislocación mixta



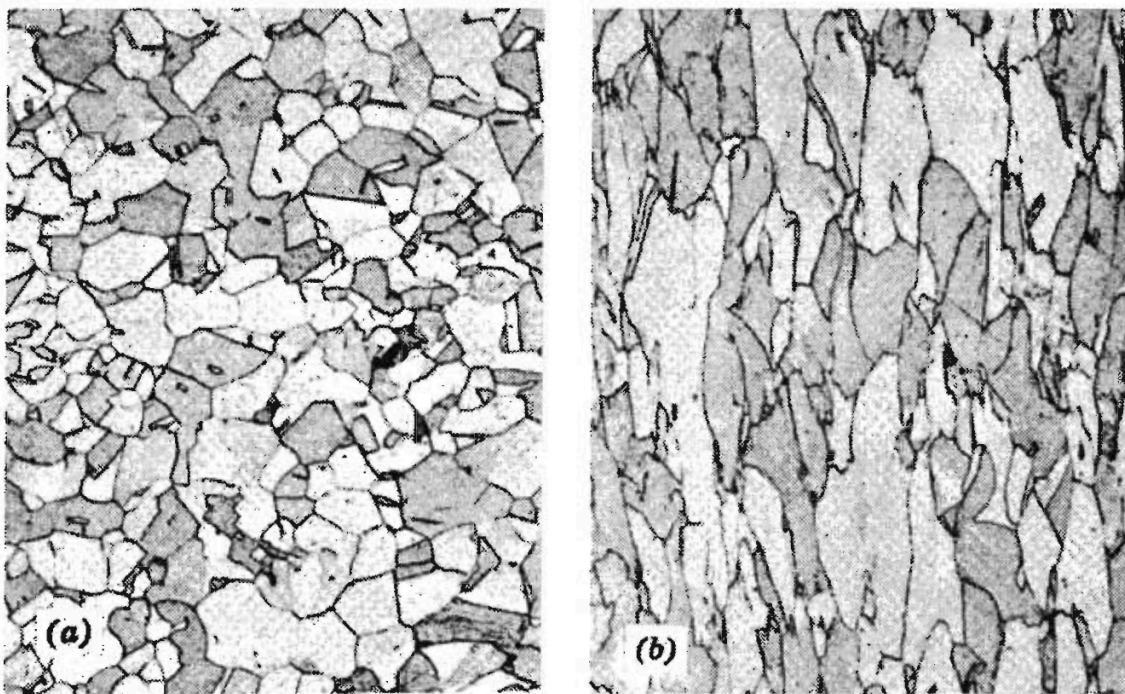
Nota. Representación de una dislocación mixta., Tomado de: Askeland, D. R., & Fulay, P. P. (2011). Ciencia e ingeniería de materiales, 6ta edición. Cengage Learning [11].

Los materiales policristalinos no se deforman de la misma manera que los materiales monocristalinos, el deslizamiento ocurre de una forma más compleja debido a las orientaciones cristalográficas, las cuales provocan que la dirección de deslizamiento varíen entre granos. Para que un material policristalino sea deformado necesita un mayor esfuerzo que para un material

monocristalino, este esfuerzo hará que las dislocaciones se muevan [6]. Antes de la deformación los granos tienen dimensiones similares, pero cuando empieza la deformación los granos tienden a alargarse a la dirección en la que la fuerza está siendo aplicada, pero el comportamiento del material puede variar significativamente según la microestructura, en la Figura 11 se nota el cambio en la forma de los granos debida a la deformación plástica [6].

Figura 11.

Metal policristalino después de la deformación plástica



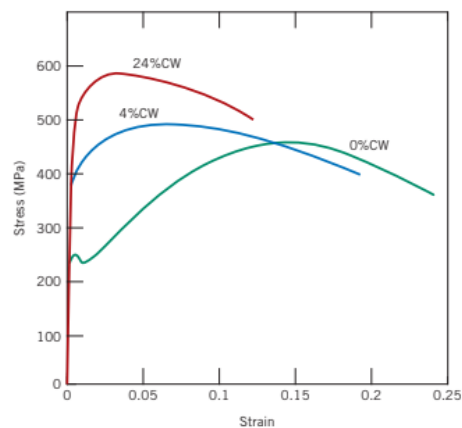
Nota. Fotomicrografía de un policristalino al ser deformado plásticamente. Tomado de: Callister, W. D., Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. John Wiley & Sons. 10th Edition. [6].

3.3. El Coeficiente De Endurecimiento Por Deformación

El endurecimiento por deformación o también conocido como endurecimiento de trabajo en frío, es un fenómeno que genera que un material dúctil aumente su resistencia y dureza al ser sometido a una deformación plástica, donde se producen cambios microestructurales del material de forma permanente, este fenómeno ocurre en temperaturas bajas o ambiente [6], es decir, donde la difusión en estado sólido es lenta y además no hay transformación de fases en el material. Este tipo de endurecimiento es generado por el movimiento de dislocaciones, generando la deformación plástica, con aumento en la densidad de estas, es por esto que la distancia entre las dislocaciones disminuye haciendo que estén mucho más agrupadas, generando una resistencia al deslizamiento. La Figura 12, muestra el comportamiento de un acero de bajo carbono sometido a trabajo en frío [6], donde se evidencia el aumento de la resistencia mecánica en el acero. En la Figura 13 se presentan tres aleaciones que se ven afectadas por el trabajo en frío, se muestra como la resistencia aumenta cuando el porcentaje de trabajo en frío aumenta, hasta un valor máximo donde la curva se torna horizontal.

Figura 12.

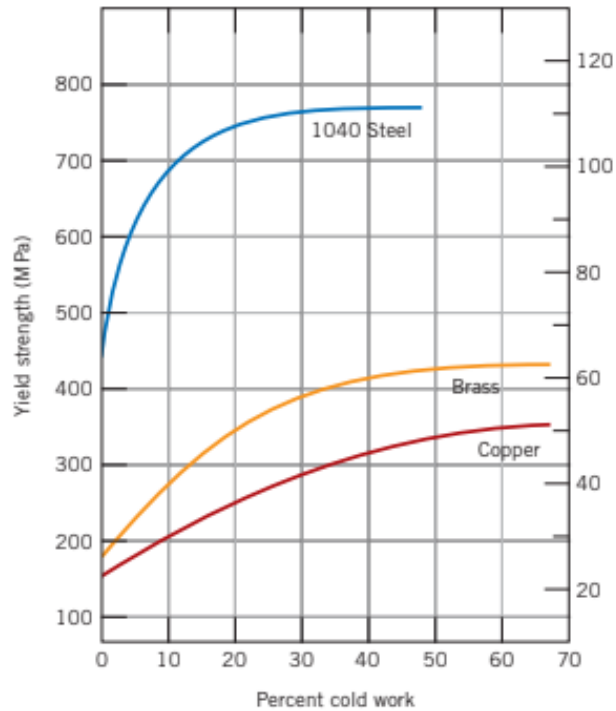
Curvas de esfuerzo deformación de un acero de bajo carbono sometido a trabajo en frío



Nota. Curvas de esfuerzo - deformación de un acero de bajo carbono sometido a trabajo en frío. Tomado de: Callister, W. D., Rethwisch, D. G. (2018). Materials Science and Engineering: An Introduction. John Wiley & Sons. 10th Edition. [6].

Figura 13.

Efecto de la deformación en frío sobre el esfuerzo de fluencia en aleaciones



Nota. Variación porcentual de aceros y aleaciones. Tomado de: Callister, W. D., Rethwisch, D. G. (2018). *Materials Science and Engineering: An Introduction*. John Wiley & Sons. 10th Edition. [6].

El coeficiente de endurecimiento por deformación representa la respuesta de un metal al trabajo en frío. Este parámetro puede ser determinado a partir de la curva de esfuerzo - deformación real, usando la ecuación de Hollomon (Ecuación 7), este coeficiente determina la cantidad máxima de deformación plástica uniforme provocada en el proceso de estiramiento [15], si el parámetro aumenta, mayor es el endurecimiento provocado en el material para una determinada deformación plástica [6] y es representado por la letra n [15], en la figura 14 se presenta la relación del coeficiente de endurecimiento con la resistencia de los materiales.

$$\sigma = K \varepsilon^n \text{ Ecuación 7}$$

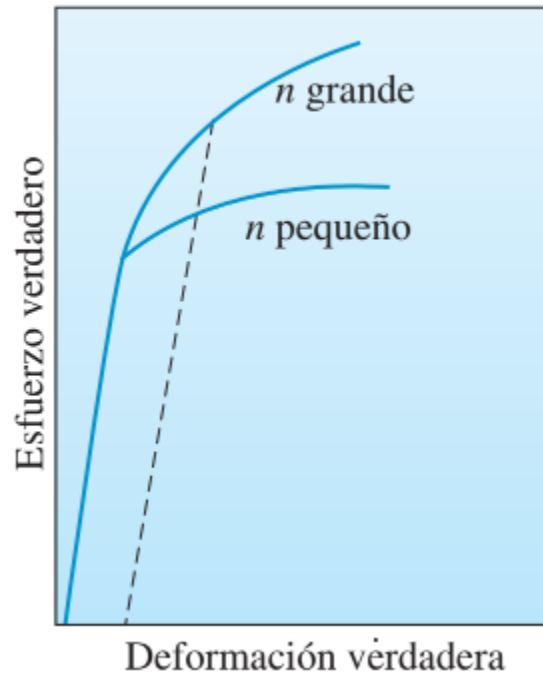
Donde σ es el esfuerzo, K es la constante de endurecimiento, ε es la deformación y n es el exponente de endurecimiento [15].

La Ecuación 8 representa la curva de esfuerzo-deformación verdadera en la región donde ocurre la deformación plástica, si se grafica en dos ejes logarítmicos, se obtiene un comportamiento lineal, donde la pendiente es el coeficiente de endurecimiento por deformación (n) y el corte con la ordenada es el coeficiente de resistencia (K), como presentado en la Figura 15.

$$\ln \sigma = \ln K + n \ln \varepsilon \quad \text{Ecuación 8}$$

Figura 14

Variación del n según deformación



Nota. Efecto de n en las curvas de esfuerzo deformación verdadera. Tomado de: Askeland, D. R., & Fulay, P. P. (2011). Ciencia e ingeniería de materiales, 6ta edición. Cengage Learning [11].

La sensibilidad a la velocidad de deformación está dada por m , la cuál describe el cambio en el esfuerzo con la rapidez de deformación, por lo general la sensibilidad en los metales es inferior a

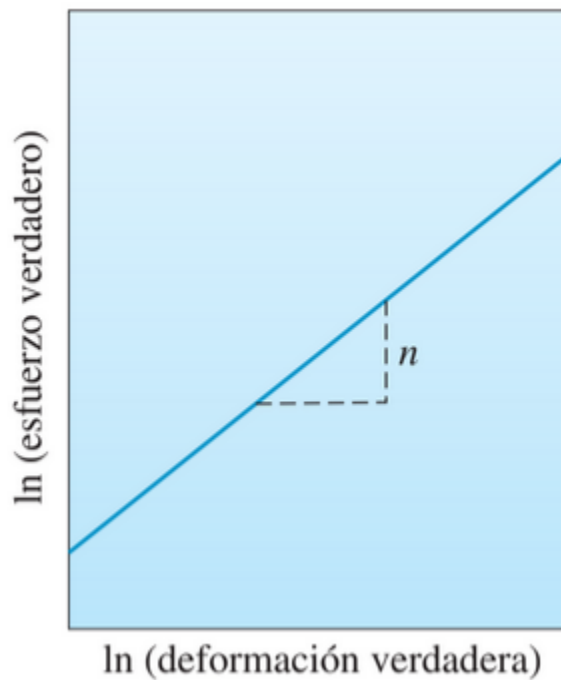
0.1, este parámetro está relacionado con el cambio de temperatura. La sensibilidad a la velocidad de deformación está dada por Ecuación 9 [11].

$$m = \frac{d(\log \sigma)}{d(\log \dot{\epsilon})} \quad \text{Ecuación 9}$$

Donde m es la sensibilidad a la velocidad de deformación, σ es el esfuerzo y $\dot{\epsilon}$ es la deformación.

Figura 15.

Pendiente de la recta para metales en proceso de deformación



Nota. Curva de esfuerzo verdadero-deformación verdadera de un metal. Tomado de: Askeland, D. R., & Fulay, P. P. (2011). Ciencia e ingeniería de materiales, 6ta edición. Cengage Learning [11].

Algunos parámetros significativos al determinar el coeficiente de endurecimiento por deformación son la temperatura, la velocidad de deformación y el tamaño de grano del material, este influye en el coeficiente n , ya que cuando el tamaño de grano disminuye el esfuerzo de

fluencia aumentan al igual que la resistencia máxima, es importante notar que para los materiales la resistencia mecánica aumenta al ser trabajados en frío [15], en la Tabla 1 se muestra el valor del coeficiente de endurecimiento por deformación (n), para algunas aleaciones [11].

Tabla 1.

Exponentes del endurecimiento por deformación y coeficientes de resistencia de metales y aleaciones comunes.

Metal	Estructura cristalina	n	K (MPa)
Titanio	HCP	0.05	1206.6
Acero aleado recocido	BCC	0.15	641.2
Acero al medio carbono templado y revenido	BCC	0.10	1572
Molibdeno	BCC	0.13	724
Cobre	FCC	0.54	317.2
Cu-30% Zn	FCC	0.50	896.3
Acero inoxidable austenítico	FCC	0.52	1517

Nota. Se muestra el valor de n de diferentes aleaciones. Tomado de: Askeland, D. R., & Fulay, P. P. (2011). Ciencia e ingeniería de materiales, 6ta edición. Cengage Learning [11].

La ecuación de Hollomon, usada para calcular el coeficiente de endurecimiento por deformación, presenta limitaciones porque no se puede aplicar a todas las aleaciones y tampoco expresa con precisión la relación entre el esfuerzo - deformación [16], es por esto que la ecuación se ha estandarizado con procedimientos para el cálculo del coeficiente de endurecimiento por deformación como lo explica la ASTM E-646 [17]. El coeficiente de endurecimiento por deformación es usado en múltiples aplicaciones ya que permite determinar las propiedades plásticas de los materiales en los que se lleva a cabo un proceso de deformación en frío. Al entender el comportamiento del material, se logrará identificar los puntos débiles y fuertes de este, ayudando a la selección del material y caracterizando los valores según parámetros geométricos que son indispensables para el diseño de componentes y así poder mejorar las propiedades mecánicas del material [18].

3.4. Normas Para Ensayos De Tracción En Materiales Metálicos

Los ensayos de tracción son una pieza importante para la caracterización de los materiales de ingeniería, estas pruebas deben ser realizadas bajo estándares específicos que garantizan que los datos obtenidos sean precisos para poder ser comparados. Diferentes instituciones y organizaciones como la American Society for testing and Materials (ASTM), Deutsches institut Normung (DIN), Association Française de Normalisation (AFNOR), British Standards Institution (BSI), American Society of Mechanical Engineer ASME, International Organization for Standardization ISO, Japanese Industrial Standards (JIS), Society of Automotive Engineers (SAE), presentan estándares para pruebas de tensión en materiales metálicos.

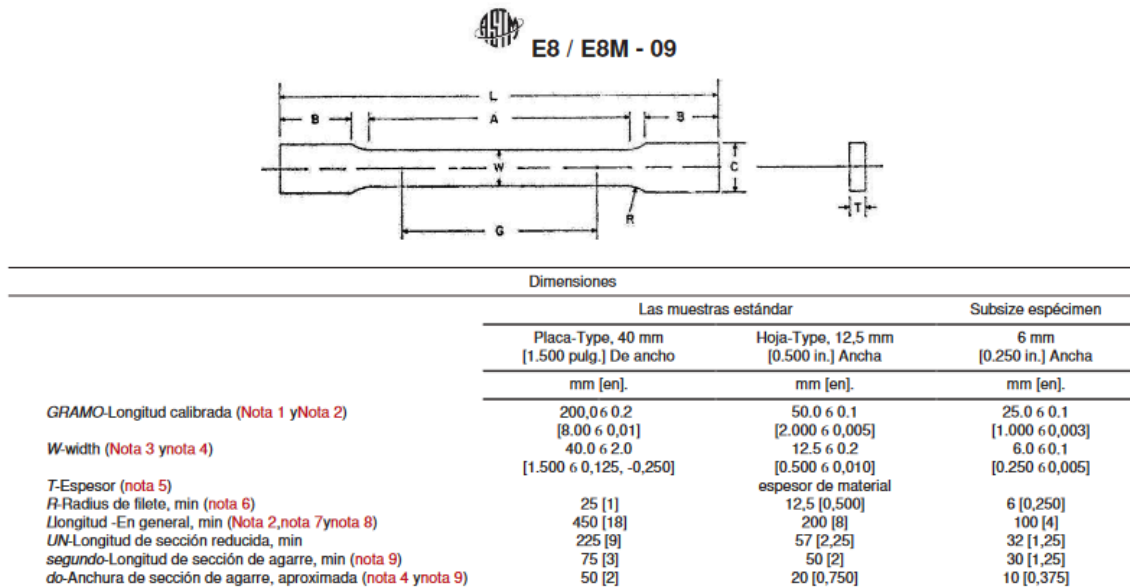
Uno de los estándares más ampliamente utilizados es la norma ASTM E8 - “*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*”. El ensayo de tracción bajo la norma ASTM -E8 proporciona las condiciones de ensayo para la determinación de la resistencia y la ductilidad de materiales metálicos que están bajo tracción uniaxial, siendo importante esta información en la comparación de los materiales, desarrollo de las aleaciones, controles de calidad y diseño de elementos estructurales [10]. Los cuerpos de prueba del ensayo de tracción son muestras mecanizadas con dimensiones y porciones específicas tomadas de una sección o parte del material que represente el material en su totalidad, es decir una muestra representativa. El ensayo evalúa y verifica que el material sea el apropiado para el uso especificado, ya sea de un lote o secciones de él y de esta forma garantizar que sea seguro su uso y tenga las mejores propiedades [10].

El ensayo de tracción se realiza en una máquina de ensayos universal, la cual permite obtener los datos para la elaboración del análisis, es importante verificar y validar el estado, condición y calibración de la máquina a usar, según la norma ASTM - E4 la máquina de ensayos universal deberá cumplir ciertos parámetros que se deben ajustar y aplicar al realizar el ensayo de tracción, deberá ser ajustada con un mínimo de fallo como el ajuste de carga, tipo de agarre y precisión de la lectura, esto se hace con el fin de extraer los datos con el menor error [10]. La norma ASTM -

E8 presenta diferentes tipos de probetas los cuales están diseñadas para distintos métodos de sujeción de las máquinas universales y también según el tipo muestra, por ejemplo placas, barras, cables, láminas y tubos. De la Figura 16 a la Figura 20, se presentan diferentes tipos de probetas especificadas en la norma ASTM-E8 [10].

Figura 16.

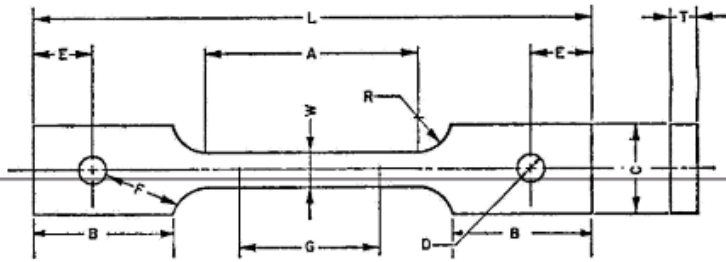
Probeta convencional o estándar para ensayos



Nota. ASTM International, (2022). Tomado de: ASTM E8/E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials1 (n-Values) of Metallic Sheet Materials. West Conshohocken, USA, PA.

Figura 17.

Probeta de carga tensión-pin la probeta con 50-mm [2-in.] longitud gage



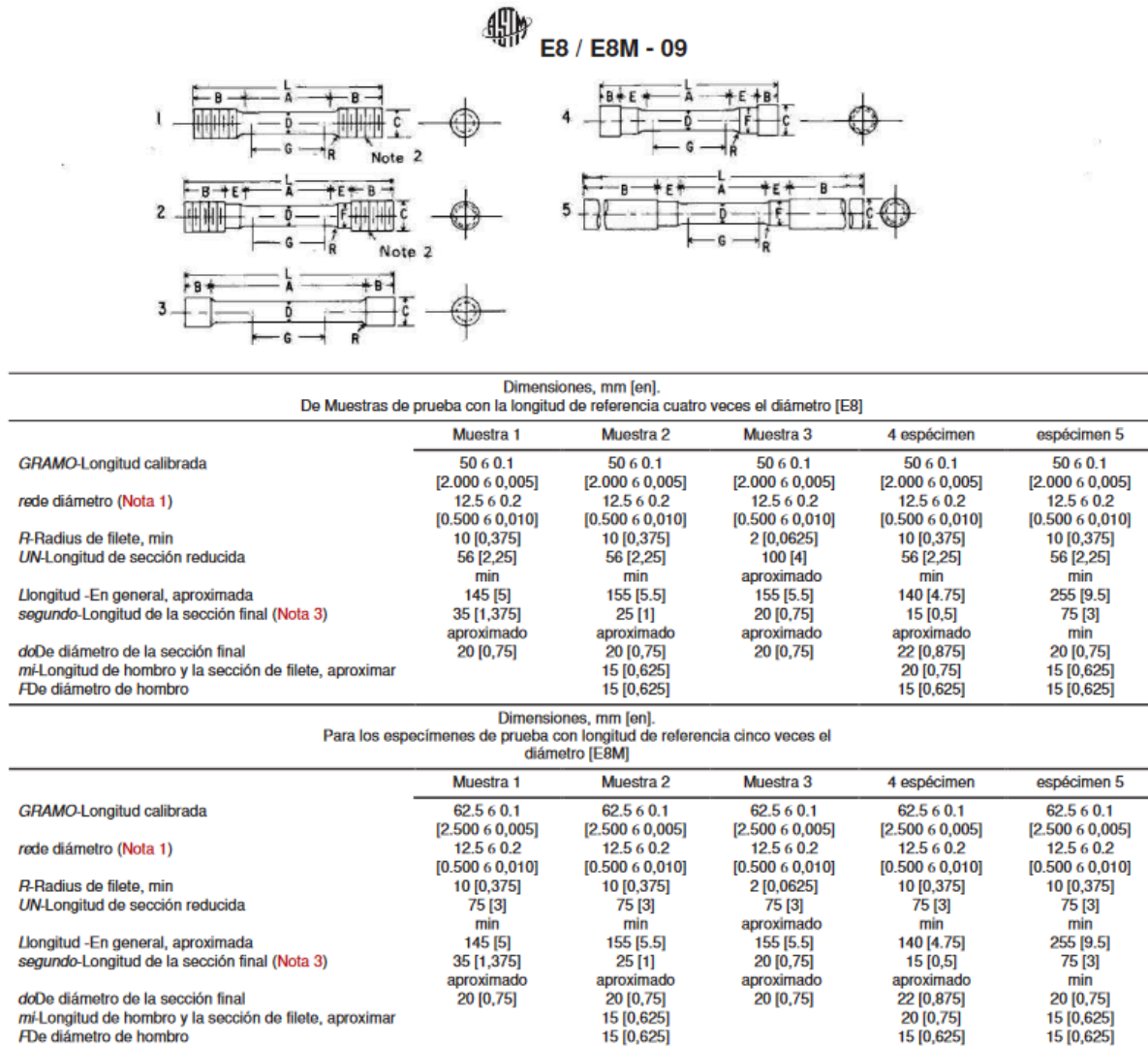
Dimensiones, mm [en].

<i>GRAMO</i> -Longitud calibrada	50.0 \pm 0.1 [2,000 \pm 0,005]
<i>W</i> -width (Nota 1)	12.5 \pm 0.2 [0,500 \pm 0,010]
<i>T</i> Grueso, max (Nota 2)	16 [0,625]
<i>R</i> -Radius de filete, min (Nota 3)	13 [0,5]
<i>L</i> longitud -En general, min	200 [8]
<i>UN</i> -Longitud de sección reducida, min	57 [2,25]
<i>segundo</i> -Longitud de sección de agarre, min	50 [2]
<i>do</i> -Anchura de sección de agarre, aproximada	50 [2]
<i>re</i> De diámetro de agujero para pasador, min (nota 4)	13 [0,5]
<i>mi</i> -Edge distancia de pin, la aproximación	40 [1,5]
<i>F</i> -Distancia de hoyo en filete, min	13 [0,5]

Nota. ASTM International, (2022). Tomado de: ASTM E8/E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials¹ (n-Values) of Metallic Sheet Materials. West Conshohocken, USA, PA.

Figura 18.

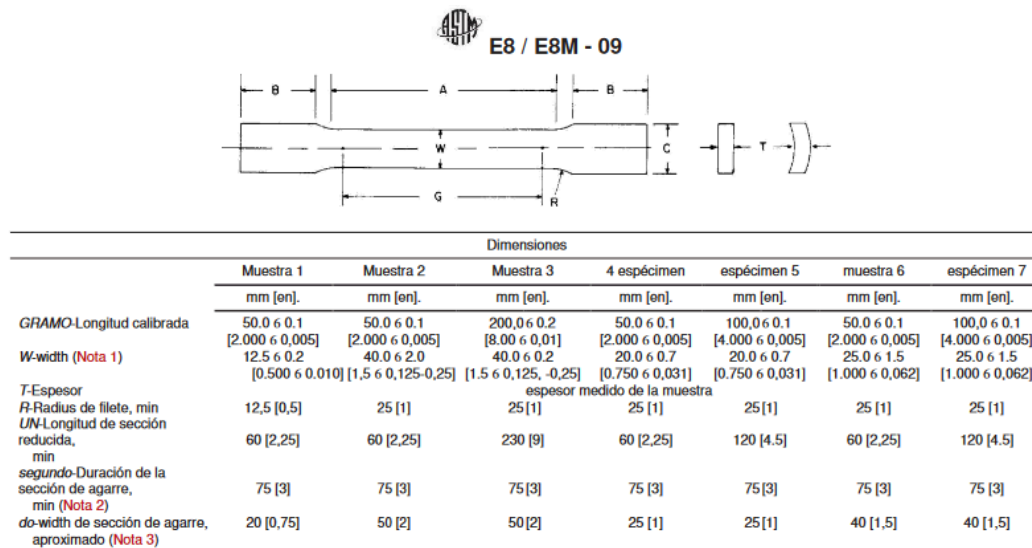
Varios tipos de fines para los estándar de tensión ronda probetas



Nota. ASTM International, (2022). Tomado de: ASTM E8/E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials¹ (n-Values) of Metallic Sheet Materials. West Conshohocken, USA, PA.

Figura 19.

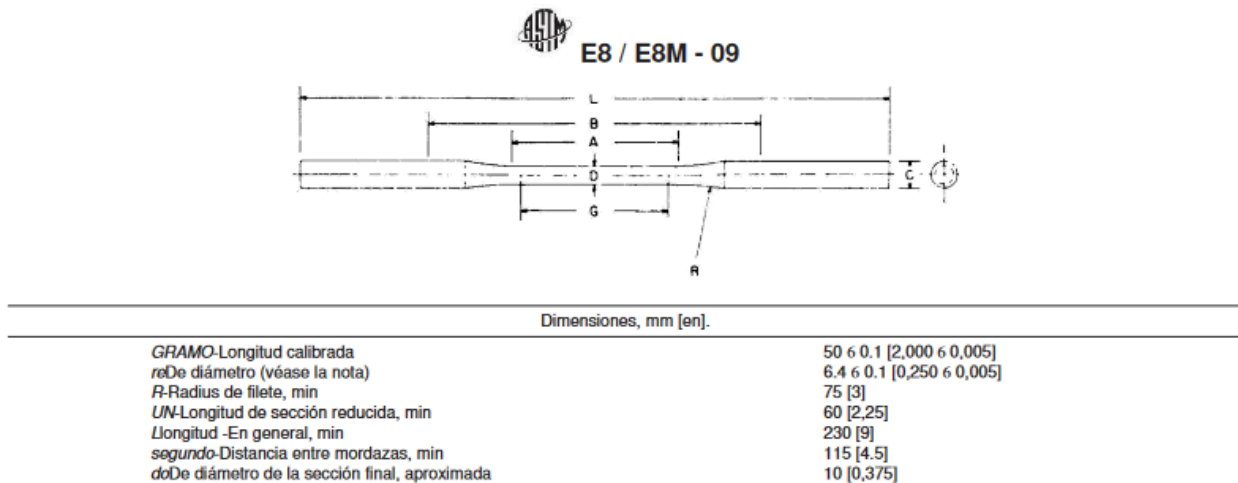
Probetas de gran diámetro tubular



Nota. ASTM International, (2022). Tomado de: ASTM E8/E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials¹ (n-Values) of Metallic Sheet Materials. West Conshohocken, USA, PA.

Figura 20.

Muestra de probeta de ensayo estándar para la tensión de hierro maleable



Nota. ASTM International, (2022). Tomado de: ASTM E8/E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials¹ (n-Values) of Metallic Sheet Materials. West Conshohocken, USA, PA.

Para realizar el ensayo de tracción se debe tener en cuenta algunas variables como temperatura, tasa de deformación y tasa carga. Cada una de estas está ligada una con la otra, debido a que el ensayo deberá cumplir con las recomendaciones de la norma. Según la especificación la temperatura es fundamental para realizar la prueba, dado que esta puede generar dilataciones o contracciones en el material, por lo tanto deberá estar a una temperatura ambiente entre 10 °C y 38 °C.

La norma muestra tres métodos de control para establecer propiedades de funcionamiento de la máquina universal de ensayos, es necesario escoger uno de los métodos para llevar a cabo el ensayo de tensión. El primer método consiste en la determinación de propiedades de fluencia estableciendo la velocidad de esfuerzo a la que debe trabajar la máquina, la cual debe estar en un rango de 1.15 MPa.s⁻¹ y 11.5 MPa.s⁻¹, el esfuerzo seleccionado no debe ser incrementado y se debe garantizar que se mantenga constante durante todos los ensayos [10].

El segundo método configura la velocidad de deformación para la determinación de las propiedades de fluencia, esta se debe mantener en un rango de 0.015 - 0.006 mm.mm⁻¹.min⁻¹ [in.in⁻¹.min⁻¹], debe ser controlada por medio de un extensómetro entre la sección calibrada [10]. El último método controla la velocidad del cabezal móvil, para la obtención de propiedades de fluencia, en un rango de 0.015 - 0.003 mm.mm⁻¹.min⁻¹[in.in⁻¹.min⁻¹], establecido en la máquina universal de ensayos, se ajusta en relación a la longitud inicial de la probeta, para mantener una tasa de desplazamiento controlada [10].

Para el procedimiento se debe realizar una inspección y verificación de herramientas, entorno y materiales, esto se ejecuta con el fin de que los datos del ensayo no presenten errores. Se debe revisar el tipo de agarre y evaluar si es necesario un acople adicional [10]. El ensayo se debe iniciar con la máquina universal de ensayos calibrada y testeada. Es necesario realizar un precalentamiento a la máquina si esta no fue usada anteriormente, luego se instala el cabezal que se usará para así realizar una prueba sin las probetas y validar la condición del equipo. Para

iniciar se realiza la medición de las probetas para determinar las secciones transversales, luego se calibra el equipo con la velocidad y fuerza que será utilizada, según el método seleccionado [10]. Para el correcto trato de los resultados se debe iniciar realizando la medición del alargamiento total y la reducción de área de la probeta, después se genera el gráfico de la curva esfuerzo - deformación ($\sigma - \epsilon$), con este gráfico se pueden determinar las propiedades mecánicas básicas como el límite elástico, esfuerzo de fluencia, módulo de elasticidad, resistencia máxima, esfuerzo de fractura, además se identifican la regiones de deformación elástica y de endurecimiento por deformación y deformación no uniforme, teniendo en cuenta que cada uno de estos resultados debe ser documentado de manera adecuada en el informe del ensayo [10].

3.5. Norma ASTM E646

La norma ASTM E646-16 (*Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n - Values) of Metallic Sheet Materials*), es un estándar usado para la determinación del exponente de endurecimiento por deformación en metales, estos son indicadores claves de la resistencia del material a la deformación plástica, haciéndolos indispensables para la evaluación de propiedades mecánicas de los materiales para la creación de diseños óptimos y seguros [19]. El método de ensayo recomendado por la norma ASTM E646-16 permite estimar la deformación en el ensayo de tracción uniaxial donde el exponente de endurecimiento por deformación es también una medida que permite comprender el aumento de la resistencia de un material debido a la deformación plástica usando la representación matemática de la Ecuación 7 [19].

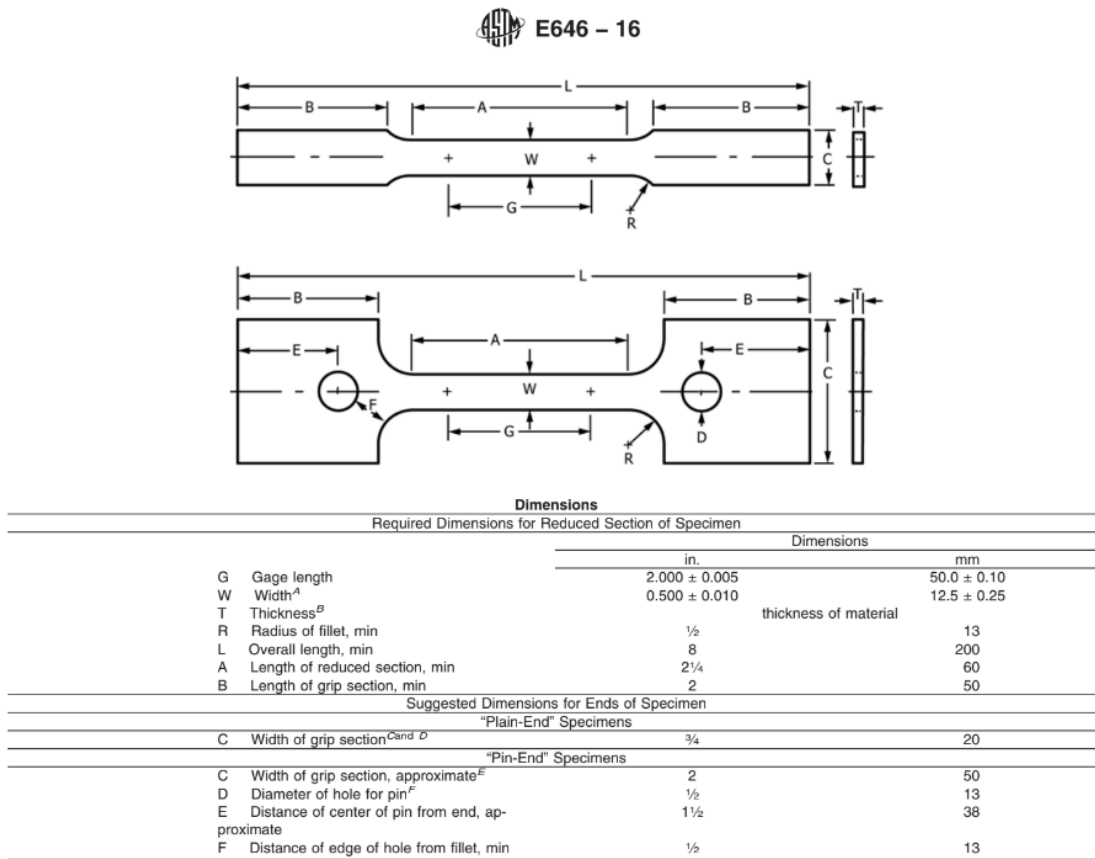
$$\sigma = K\epsilon^n \quad \text{Ecuación 7}$$

Este estándar puede ser usado solamente en láminas de metales que están entre los 0.13mm - 6.4mm de espesor y para materiales con una curva de esfuerzo - deformación continua para que la determinación del coeficiente de endurecimiento por deformación pueda ser calculado desde la curva en cualquier punto [19]. Por lo general, la mayor de estas deformaciones se producen en el momento anterior en el que se produce la fuerza máxima, normalmente el límite inferior de estas deformaciones es la deformación de fluencia, es por esto que la norma determina la respuesta del

material durante la deformación plástica y la creación del cuello (necking) [19]. Para dar inicio al desarrollo del ensayo es necesario seleccionar el material a estudiar y tener en cuenta sus especificaciones, para así elegir la geometría de la probeta y sus planos de elaboración, se debe evitar la introducción de tensiones residuales ya que pueden estar presentes en el material para así proceder a la creación de las probetas metálicas basadas en la Figura 21 como lo dicta la norma [19].

Figura 21.

Probetas de ensayo esfuerzo deformación ASTM E646-16

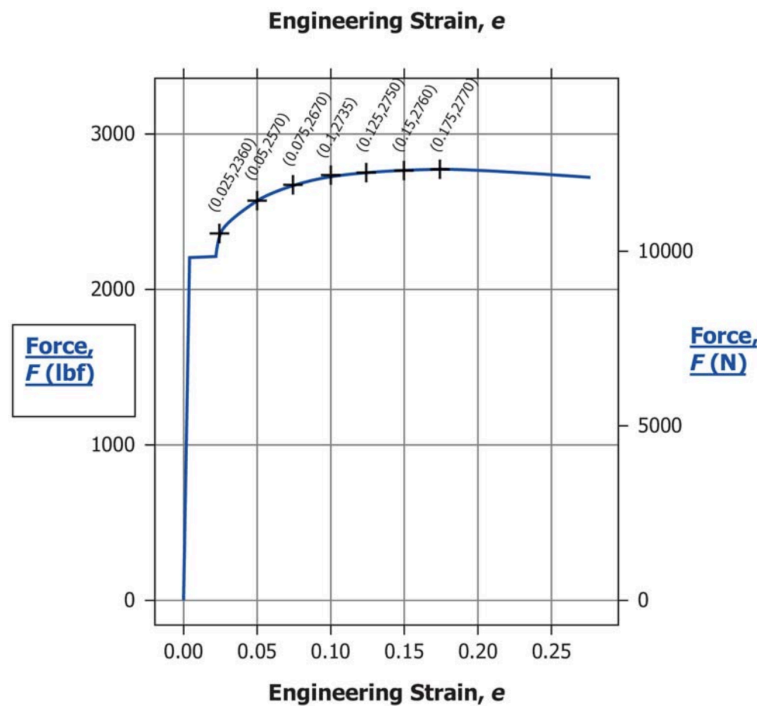


Nota. Probetas necesarias para el desarrollo del ensayo de tracción basado en ASTM International, (2016). Tomado de: ASTM E646-15, Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n-Values) of Metallic Sheet Materials. West Conshohocken, USA, PA [19].

Se registran los datos iniciales de la probeta (Lo y A), se utiliza el respectivo sistema de agarre que permita asegurar la alineación axial del espécimen dado en la norma ASTM E8, es necesario hacer esta prueba en mínimo cinco especímenes para que la norma sea válida, en la Figura 22 y la Figura 23 se presenta la forma en que se deben seleccionar los datos que serán tratados matemáticamente para obtener el coeficiente de endurecimiento por deformación y el coeficiente de resistencia [19].

Figura 22.

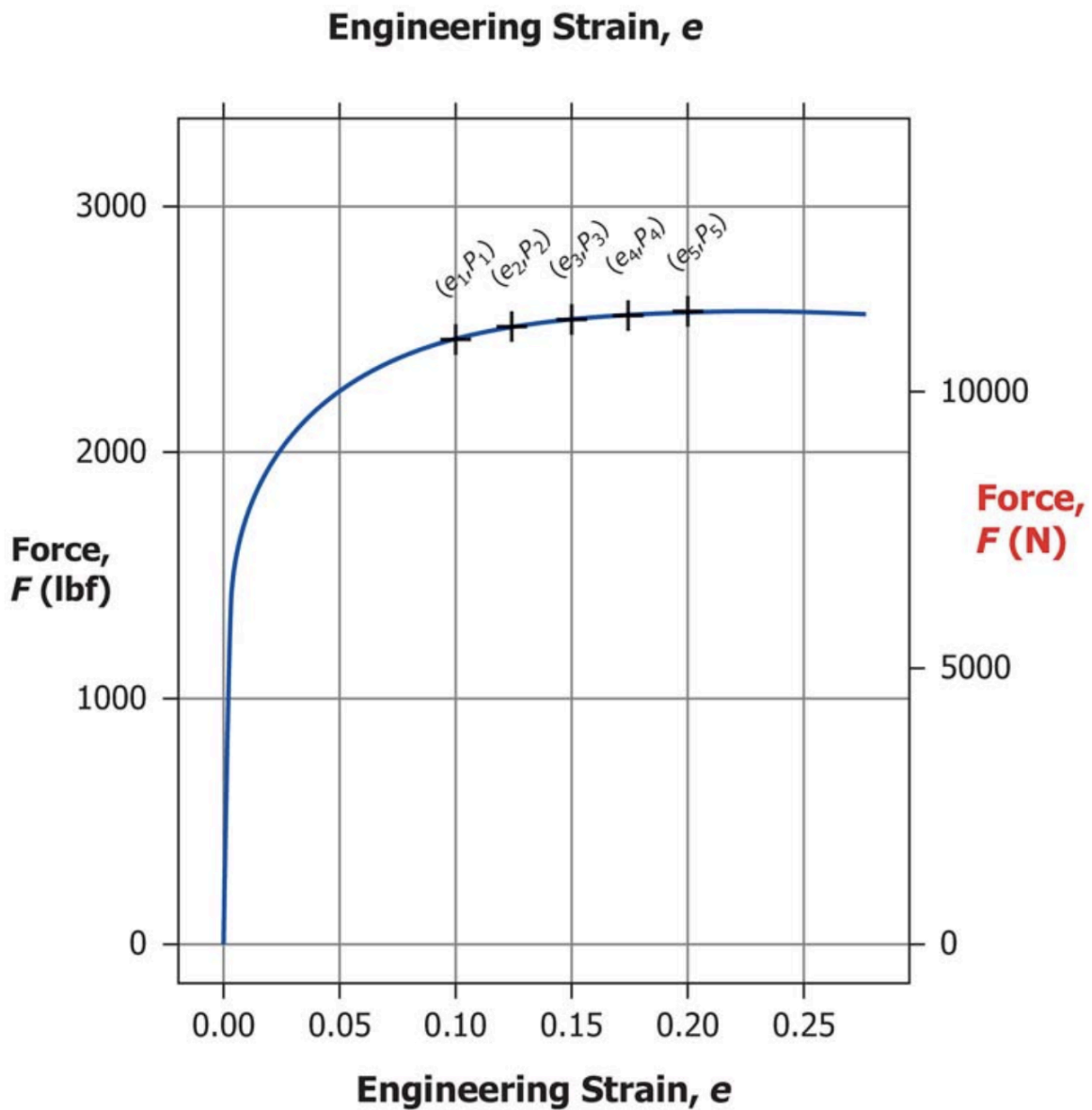
Pares de datos obtenidos de la curva de esfuerzo - deformación con fluencia discontinua



Nota. Ejemplo de elección de pares de datos necesarios para el desarrollo del proceso de ensayo de tracción en un acero de bajo carbono basado en ASTM International, (2016). Tomado de: ASTM E646-15, Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n-Values) of Metallic Sheet Materials. West Conshohocken, USA, PA [19].

Figura 23.

Pares De Datos Obtenidos De La Curva De Esfuerzo - Deformación Sin Fluencia Discontinua



Nota. Ejemplo de pares de datos necesarios para el desarrollo del proceso de ensayo de tracción en un metal sin punto de fluencia superior e inferior basado en ASTM International, (2016). ASTM E646-15, Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n-Values) of Metallic Sheet Materials. West Conshohocken, USA, PA [19].

Cabe notar que la velocidad de la prueba debe garantizar que el esfuerzo y la deformación se indiquen con precisión, sin cambiar durante el ensayo, en caso de que esta no esté especificada se debe mantener la velocidad de deformación unitaria en un rango de $0.05 \text{ mm.mm}^{-1} [\text{in.in}^{-1}]$, a $0.50 \text{ mm.mm}^{-1} [\text{in.in}^{-1}]$, por minuto con respecto a la longitud calibrada.

Se deben seleccionar al menos cinco puntos de la curva igualmente espaciados, para así usarlos para el cálculo del coeficiente de endurecimiento por deformación [19].

Para el proceso de análisis de datos es necesario hacer la construcción de la gráfica de esfuerzo-deformación, esta se elabora con base en los datos de esfuerzo y deformación real, estos deben ser determinados a partir de los datos obtenidos del ensayo, calculados con las ecuaciones proporcionadas por la norma [19]. En el cálculo de la deformación real se usa la Ecuación 10.

$$\varepsilon = \ln\left(\frac{L}{L_o}\right) \text{ Ecuación 10}$$

Donde ε es la deformación, L la longitud actual de la lámina, L_o la longitud inicial de la lámina [19]. El esfuerzo real, será calculado con la Ecuación 11.

$$\sigma = \frac{FL}{A_o L_o} = S(1 + e) \text{ Ecuación 11}$$

Donde σ es esfuerzo, F la fuerza aplicada, A_o el área transversal inicial, L_o la longitud inicial de la lámina, S el esfuerzo y e la deformación ingenieril [19]. Para calcular el coeficiente de esfuerzo por deformación es utilizada la Ecuación 12.

$$n = \frac{N \sum_{i=q}^N (\log \varepsilon_i \log \sigma_i) - (\sum_{i=1}^N \log \varepsilon_i) (\sum_{j=1}^N \log \sigma_j)}{N \sum_{i=1}^N (\log \varepsilon_i)^2 - (\sum_{i=1}^N \log \varepsilon_i)^2} \text{ Ecuación 12}$$

Donde ε es la deformación, σ es esfuerzo, n el coeficiente de endurecimiento por deformación y N el número de pares de datos usados (σ_i, ε_i) [19]. El coeficiente de resistencia y la desviación estándar asociada a los datos experimentales se calcula de acuerdo a las ecuaciones 13 y 14.

$$\log K = \frac{\sum_{i=1}^N (\log \sigma_i) - n \sum_{i=1}^N \log \varepsilon_i}{N} \quad \text{Ecuación 13}$$

Donde K es el coeficiente de resistencia, σ es esfuerzo, n el coeficiente de endurecimiento por deformación y N el número de pares de datos usados (σ_i, ε_i) [19].

$$SD_n = \left[\frac{N \sum_{i=1}^N (\log \sigma_i - \log K - n \log \varepsilon_i)^2}{(N-2) - (N \sum_{i=1}^N \log \varepsilon_i)^2 - (\sum_{i=1}^N \log \varepsilon_i)^2} \right]^{1/2} \quad \text{Ecuación 14}$$

Donde SD_n es la desviación estándar del exponente de endurecimiento por deformación, σ es esfuerzo, n el coeficiente de endurecimiento por deformación y N el número de pares de datos usados (σ_i, ε_i) [19].

La norma ASTM E646, describe en detalle el procedimiento para determinar los parámetros n y K a partir de datos experimentales, utilizando ecuaciones derivadas del comportamiento de la curva esfuerzo deformación real. De esta manera se logra realizar la curva esfuerzo-deformación para así tener las propiedades mecánicas del material.

La norma expone un ejemplo de cómo los datos pueden ser organizados para mayor comprensión como mostrado en la Tabla 2.

Tabla 2.

Ejemplos de datos ordenados obtenidos manualmente

TABLE X1.1 An Example of Calculating the Strain-Hardening Exponent and Standard Deviation by Method B

Tabulation of Data from Test and Preliminary Evaluation											
Data Pair	Load, F , kips ^A	Engineering Stress, ksi ^B	True Stress, σ , ksi ^C	$Y = \log_{10}\sigma$	Y^2	Extension, in ^A	Engineering Strain, ϵ^D	True Strain, ϵ^E	$X = \log_{10}\epsilon$	X^2	XY
1	2.360	44.81	45.93	1.66209	2.76254	0.050	0.025	0.02469	-1.60743	2.58384	-2.67170
2	2.570	48.80	51.24	1.70958	2.92265	0.100	0.050	0.04879	-1.31167	1.72047	-2.24240
3	2.670	50.69	54.50	1.73637	3.01499	0.150	0.075	0.07232	-1.14074	1.30128	-1.98075
4	2.735	51.93	57.12	1.75680	3.08636	0.200	0.100	0.09531	-1.02086	1.04216	-1.79345
5	2.750	52.21	58.74	1.76894	3.12914	0.250	0.125	0.11778	-0.92892	0.86289	-1.64320
6	2.760	52.40	60.26	1.78006	3.16861	0.300	0.150	0.13976	-0.85461	0.73036	-1.52126
7	2.770	52.59	61.80	1.79097	3.20758	0.350	0.175	0.16127	-0.79245	0.62798	-1.41926
$N = 7$				$\sum Y = 12.20481$	$\sum Y^2 = 21.29187$				$\sum X = -7.65668$	$\sum X^2 = 8.86898$	$\sum XY = -13.27200$

Nota. Ejemplo de datos obtenidos manualmente y como pueden ser organizados. Tomado de: ASTM International, (2016). ASTM E646-15, Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n-Values) of Metallic Sheet Materials. West Conshohocken, USA, PA [19].

3.6. El Acero ASTM A500

La norma ASTM A500 es la especificación para tubos de acero al carbono soldadas en frío y sin costura con secciones redondas, cuadradas y rectangulares, usados en aplicaciones de construcción y desarrollos estructurales [20]. Estos tubos de acero estructural son clasificados en cuatro tipos o grados (grados A, B, C y D), el Grado A que incluye los tubos con resistencia mínima a la tracción de 310 MPa y resistencia a la fluencia mínima de 270 MPa, Grado B donde la resistencia mínima a la tracción es de 400 MPa y la resistencia a la fluencia mínima de 315 MPa. En la Tabla 3, son presentadas las propiedades mecánicas de los cuatro grados que especifica la norma. La variación de la composición química según la norma ASTM A500, de estos cuatro grados se presenta con detalle en la Tabla 4 [20].

Tabla 3.*Tabla de resistencia del ASTM A500*

TUBO ESTRUCTURAL ASTM A500				
GRADO	GRADO A	GRADO B	GRADO C	GRADO D
Resistencia a la traccion (MPa)	310	400	427	400
Limite elastico (MPa)	228	290	317	250
Alargamiento 2 in, (50.8 mm),min,%A	25B	23C	21D	23C

Nota. Requisitos mínimos de resistencia para el acero ASTM A500 dependiendo de su grado. Tomado de: United Steel Industry, Member Of USI Group ASTM A500 para tubería estructural de acero al carbono soldada y sin costura conformada en frío. <https://www.united-steel.com/es/newsshow/363.html> [20].

Tabla 4.*Composición química de los diferentes grados de acero*

Grado	UNS	Composición (% en peso en calor)				
		C	Mn	P	S	Cu
		max %	max %	max %	max %	min %
A	K03000	0.26	1.35	0.035	0.035	0.20
B	K03000	0.26	1.35	0.035	0.035	0.20
C	K02705	0.23	1.35	0.035	0.035	0.20
D	K03000	0.26	1.35	0.035	0.035	0.20

Nota. Tabla indicadora de la composición química del material según el grado. Tomado de: Perpetual Steel Manufacturing Co.Ltd (2017) ASTM A500 para tubería estructural de acero al carbono soldada y sin costura conformada en frío. <https://www.permanentsteel.com/es/m/newsshow/astm-a500.html> [20].

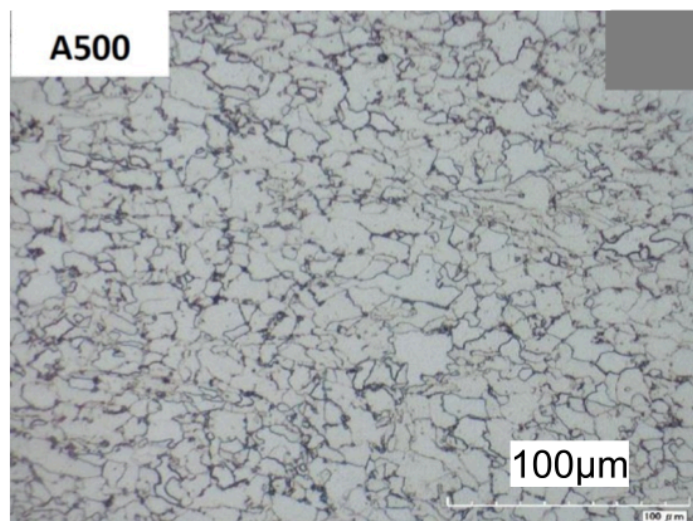
De acuerdo a las propiedades mecánicas y composición química del acero A500, este es caracterizado como un material con alta resistencia mecánica, comparado con aceros estructurales y ha hecho que sea reconocido en la industria como uno de los materiales más

usados para la construcción de estructuras [20]. El acero A500 grado C es usado para la estructuras de uso generales en la construcción, en puentes y edificios las uniones son soldadas o remachadas, este tipo de elementos estructurales debe cumplir con ciertos requisitos de composición química, como lo muestra la Tabla 4 [20].

En la Figura 24 Se presenta la microestructura característica de un acero ASTM A500 [21], esta formada por granos de ferrita con islas pequeñas de perlita, las cuales se identifican con las regiones de color oscuro. Esta microestructura es típica de los aceros de bajo carbono, la cual le confiere las propiedades mecánicas además de una buena soldabilidad.

Figura 24.

Muestra metalográfica de un acero ASTM A500



Nota. Microestructura de un acero ASTM A500. Tomado de: Morrison, Machel. (2018). A Ductile Fuse For Special Concentrically Braced Frames. 10.18057/ICASSP 2018 [21].

3.8. Aluminio Comercial

El aluminio comercial no se refiere a una aleación específica sino a una manera general para describir aleaciones de aluminio que son usadas en distintas aplicaciones en la industria, ya que es conocido por su bajo peso y alta resistencia a la corrosión, es un buen conductor del calor y electricidad, puede ser reciclado y procesado, las aleaciones más comunes que se encuentran en el mercado son la 3XXX, 5XXX y 6XXX [22]. Como se observa en la Tabla 5, son clasificadas en tres tipos: aleaciones forjadas no tratables térmicamente, usadas para la fabricación de componentes eléctricos, latas de alimentos, metal de soldadura y usos arquitectónicos, las aleaciones forjadas tratables térmicamente, usadas para componentes o piezas de los vehículos automóviles, émbolos y partes de aviones, las aleaciones fundidas son usadas para carcazas de motor, motores de automoviles y maquinaria; cada una de ellas es usada en la industria en aplicaciones diferentes y muchas veces tratada para mejorar sus propiedades mecánicas [22].

Tabla 5.

Aleaciones comerciales de aluminio

Aleación		Resistencia a la tensión (MPa)	Resistencia a la fluencia (MPa)	Porcentaje de elongación	Aplicaciones
Aleaciones forjadas no tratables térmicamente					
1100-O	>99% Al	89.6	34.5	40	Componentes eléctricos, papel aluminio, procesamiento de alimentos, latas de bebidas refrescantes, usos arquitectónicos, metal de relleno para soldadura, tapas de latas de bebida refrescante, componentes marinos.
1100-H18		165.5	152	10	
3004-O	1.2% Mn-1.0% Mg	179.3	69	25	
3004-H18		283	248	9	
4043-O	5.2% Si	145	69	22	
4043-H18		283	269	1	
5182-O	4.5% Mg	290	131	25	
5182-H19		420	393	4	
Aleaciones forjadas tratables térmicamente					
2024-T4	4.4% Cu	469	324	20	Ruedas para camiones, fuselajes para aviones, émbolos, canoas, carros de ferrocarril y bastidores de aviones.
2090-T6	2.4% Li-2.7% Cu	552	517	6	
4032-T6	12% Si-1% Mg	379	317	9	
6061-T6	1% Mg-0.6% Si	310	276	15	
7075-T6	5.6% Zn-2.5% Mg	572	503	11	
Aleaciones fundidas					
201-T6	4.5% Cu	483	434	7	Carcazas de transmisión, piezas coladas de uso general, conexiones en aviones, carcazas de motor, motores de automóviles, equipo para manejo de alimentos, conexiones marinas.
319-F	6% Si-3.5% Cu	186	124	2	
356-T6	7% Si-0.3% Mg	228	165	3	
380-F	8.5% Si-3.5% Cu	317	159	3	
390-F	17% Si-4.5% Cu	283	241	1	
443-F	5.2% Si (colado en arena)		55	8	
	(molde permanente)	131	62	10	
	(fundido a presión)	159	110	9	
		228			

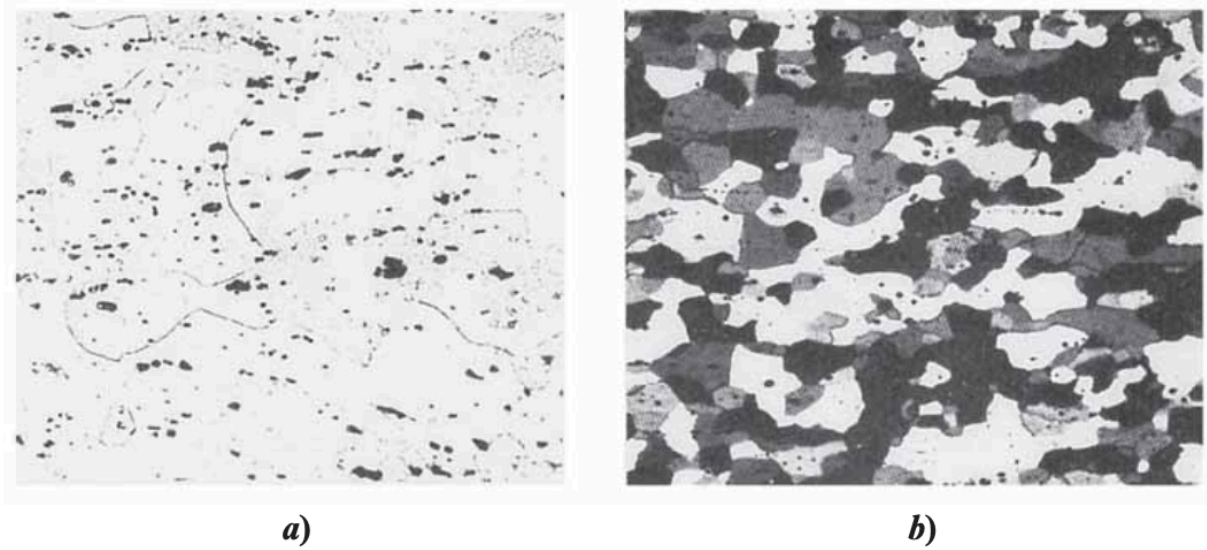
Nota. Tabla de las aleaciones comerciales con sus aplicaciones, composición química y propiedades mecánicas. Tomado de: basada en Askeland, D. R., & Fulay, P. P. (2011). Ciencia e ingeniería de materiales, 6ta edición. Cengage Learning. [11].

El endurecimiento por deformación, conocido también como trabajo en frío, sólo puede ser utilizado para endurecer materiales que no puedan ser tratados térmicamente, es por eso que para los aluminios este proceso sólo se puede llevar a cabo en aleaciones forjadas no tratables térmicamente [15].

En la Figura 25 se presenta la microestructura de una aleación de aluminio 1100 (Figura 25a) y una aleación de aluminio 5457 (Figura 25b), estos fueron recocidos y presentan precipitados dispersos en la microestructura.

Figura 25.

Muestra metalográfica de una aleación de aluminio



Nota. Microestructura de una aleación de aluminio. Tomado de: en Askeland, D. R., & Fulay, P. P. (2011). Ciencia e ingeniería de materiales, 6ta edición. Cengage Learning. [11].

3.9. Coeficiente De Endurecimiento Por Deformación En El Acero ASTM A500 Y El Aluminio Comercial

El coeficiente de endurecimiento por deformación en los materiales estructurales es un parámetro que permite caracterizar y analizar de una mejor manera las aleaciones que se usan en la industria por medio de ensayos de tracción y cálculos, dando a conocer como la resistencia del material aumenta con la deformación plástica [6].

El coeficiente de endurecimiento por deformación (n) determina la capacidad del material de endurecerse mediante trabajo en frío, es por esto que los estudios se enfocan en aceros y aleaciones no ferrosas, que se pueden trabajar en frío y no son susceptibles a los tratamientos térmicos y generalmente necesitan procesos adicionales para mejorar la resistencia mecánica.

Muchos tipos de materiales puede alcanzar un alto nivel de endurecimiento por deformación antes de que se produzca el cuello y se genere la fractura, para conocer el límite al que se puede endurecer el material es necesario determinar el exponente n , llevando a cabo una serie de ensayos de tracción con los materiales requeridos para los estudios y así poder generar la curva de esfuerzo - deformación verdadera, esto permitirá determinar las etapas de deformación material, permitiendo caracterizar su comportamiento y determinar el valor de n y K [6].

Para poder conocer el coeficiente de endurecimiento por deformación en las aleaciones de aluminio, es necesario entender que este depende de la composición de la aleación, R. K. Gupta realizó un estudio en 2015 donde determinó el exponente n para aleaciones usadas en la industria aeroespacial. Según el estudio, la aleación que más se endurece mediante el trabajo en frío es la AA6061, que contiene magnesio, silicio y aluminio como materiales principales y cuenta con un coeficiente n de 0.23 como lo muestra la Tabla 6, luego de ella sigue la aleación que tiene un coeficiente n menor de endurecimiento que es la AA7075, que contiene magnesio, aluminio, zinc y cobre con un n de 0.21 [15]. Al hacer el análisis, el estudio demuestra que las aleaciones de aluminio tienen un coeficiente de endurecimiento por deformación muy bajo a comparación de los otros materiales, estas aleaciones son consideradas con una buena formabilidad [15].

Tabla 6.*Coefficiente de endurecimiento por deformación de aleaciones de aluminio*

SL. no.	Alloy	Strain hardening coefficient
1	AA6061	0.23
2	AA2024	0.16
3	AA7075	0.21
4	AA7010	0.07
5	AA2014	0.12
6	CP Al	0.17

Nota. Tabla del coeficiente de endurecimiento por deformación. Tomado de: Ensayos de tracción basado en Gupta, R. K.; Mathew, Christy; Ramkumar, P. (2015). Strain Hardening in Aerospace Alloys. *Frontiers in Aerospace Engineering*, Vol. 4 No. 1 [15]

En la tabla 7 se presenta el resultado del estudio teórico de los coeficientes de endurecimiento y de resistencia en aleaciones de aluminio [23].

Tabla 7.*Tabla de datos de aleaciones de aluminio*

Material	Ly12cz (rod)	Le4cs	2024-T4	7075-T6	Ly12cz (plate)	Le9cgs3
ψ , %	16.5	16.6	35	33	26.6	21.0
σ_f	643	711	634	745	618	748
ϵ_f , %	18	18	43	41	30	28
σ_b	545	614	476	579	476	560
$\sigma_{0.2}$	400	571	303	469	332	518
α , %	3.0	3.0	15.1	13.5	8.0	6.0
n	0.158	0.063	0.200	0.113	0.089	0.071
k	850	775	807	827	545	725
n_t	0.152	0.059	0.190	0.113	0.088	0.066
δn_t , %	-3.8	-6.3	-5.0	0.0	-0.8	-7.0
k_t	835	786	744	824	479	752
δk_t , %	-1.7	1.4	-7.8	-0.4	-12.2	3.8
n'	0.106	0.049	0.137	0.087	0.124	0.074
$\delta n'$, %	-32.9	-22.2	-31.5	-23.1	39.7	4.2
k'	772	774	710	805	717	821
$\delta k'$, %	-9.2	-0.1	-12.0	-2.7	31.6	13.3

Nota. Tabla de los datos para el cálculo teórico de los coeficientes n y K , basado en Zhang, Z., Zhao, W., Sun, Q. et al. Theoretical calculation of the strain-hardening exponent and the strength coefficient of metallic materials. *J. of Materi Eng and Perform* 15, 19–22 (2006). [23]

Otro estudio realizado por Volosevich en Ucrania en el 2015, explica que existen tres grupos de aleaciones clasificados por el número de coeficiente de endurecimiento, el primer grupo se clasifican los aceros que no tienen un cambio de coeficiente de endurecimiento por deformación

en todo el rango, para el segundo grupo el coeficiente n aumenta 0.2 cuando hace la transición de la deformación uniforme a la no uniforme, en el grupo tres este comportamiento no es de aumento si no de disminución del coeficiente. En la Tabla 8 se pueden observar algunas de las propiedades de estas aleaciones, las cuales fueron tratadas con procesos térmicos para luego calcular sus propiedades, incluyendo el coeficiente de endurecimiento por deformación clasificándolos en el grupo correspondiente según el comportamiento de este [24].

Tabla 8.

Propiedades mecánicas de algunas aleaciones de acero

Steel, treatment	T_{te} , K	$\sigma_{0.2}$, N/mm ²	σ_u , N/mm ²	σ_f^f , N/mm ²	ψ_f , %	e_u	e_f	n [1]	n^{II} (n^{III}) [1]	Group
Y8 Steel										
1.5-h annealing at 900°C	293	379	855	977	14.8	0.125	0.160	0.227	-0.146	III
	77	980	1152	1188	1.2	0.010	0.012	0.109	—	I
Steel 40										
Quenching from 880°C in water + 0.5-h annealing at 400°C	293	1170	1257	1886	57.5	0.072	0.856	0.040	0.129	II
30XГСА Steel										
0.5-h annealing at 920°C	293	372	728	1069	54.9	0.329	0.795	0.196	0.079	III
Normalization	293	739	1198	1498	30.9	0.207	0.370	0.149	0.039	III
Quenching from 860°C in oil	293	1532	1755	2459	48.6	0.125	0.666	0.063	0.131	II

Nota. Tabla de los datos de propiedades mecánicas para algunas aleaciones de acero, obtenido de Volosevich, P. Y., & Shiyan, A. V. (2015). Stress concentration and strain hardening in structural steel. *Steel in Translation*. [24]

Por otro lado, también se encontró un estudio realizado por un grupo de científicos que realizaron ensayos de tracción para una chapa de acero de bajo carbón, para ello realizaron diferentes tipos de muestras, con geometrías diferentes, al igual que con secciones que se pudieran diferenciar, una de las técnicas usadas fue el grillado especialmente usado para visualizar el comportamiento del material al ser sometido bajo este proceso, esto permitió la realización de mediciones necesarias para el análisis del estiramiento del material [25].

Un dato curioso de esta práctica es que los científicos realizaron distintos tipos de ensayos de tracción, un ensayo uniaxial en sentido transversal, otro en sentido longitudinal, donde las probetas fueron entalladas en una sección y dos ensayos de tracción biaxial, con el propósito de obtener las curvas de límite superior como inferior para extraer los datos de deformación y obtener estadísticamente valores adicionales [25].

Luego de realizar la extracción de estos valores obtuvieron una tabla, en la cual anexaron los datos de n en los diferentes tipos de chapas que estudiaron [25].

Tabla 9.

Propiedades Resultados de los ensayos en los distintos tipos de chapa.

Tabla 2. Coeficientes de endurecimiento.

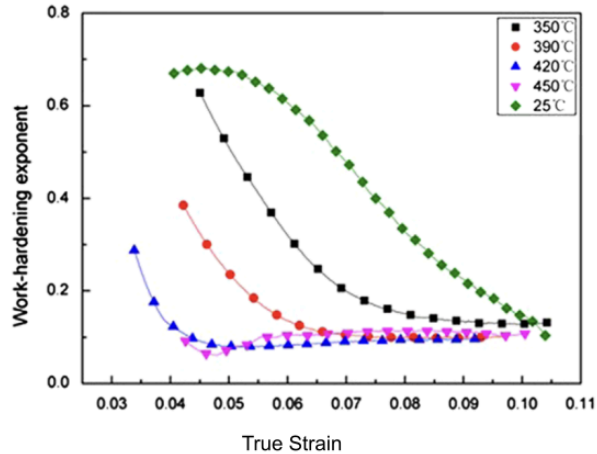
Probeta	n_{90}
Chapa I	0.171
Chapa II	0.192
Chapa III	0.201

Nota. Resultados obtenidos del coeficiente de endurecimiento por deformación para las 3 chapas, obtenido de Ziegler, D., Pedraza, J., Berge, G., Insausti, J., Lucaioli, A., Monesterolo, P., Puccinelli, M. (2018) Relación Entre Parámetros Mecánicos Y Curvas Límite De Conformado De Chapas De Acero De Bajo Carbono. Univ. Nacional del Sur, Argentina [25].

También es necesario hablar de J. Zhang (2013), quien estudió el comportamiento del coeficiente de endurecimiento por deformación en aceros de bajo carbono, utilizó la ecuación de Hollomon (Ecuación 9) para realizar el cálculo de n , realizando la comparación del comportamiento de este parámetro en diferentes temperaturas, como se muestra en la Figura 26 [26].

Figura 26.

Comportamiento del coeficiente de endurecimiento por deformación en diferentes temperaturas



Nota. Gráfico Del Comportamiento Del Coeficiente De Endurecimiento Por Deformación De Una Aleación De Bajo Carbono en diferentes temperaturas obtenido de Zhang, J., Ding, H., Wang, C., Zhao, J., & Ding, T. (2013). Work hardening behaviors of a low carbon Nb-microalloyed Si-Mn quenching-partitioning steel with different cooling styles after partitioning. *Materials Science & Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, 585, 132–138. [26]

En la gráfica se puede observar que el mayor endurecimiento por deformación se da en una deformación unitaria real de 0.05 a 25°C con un n de 0.7 aproximadamente. En altas temperaturas el endurecimiento por deformación es bajo [26].

4. MATERIALES Y PROCEDIMIENTO EXPERIMENTAL

Los materiales usados en este estudio fueron, un perfil de aluminio comercial (arquitectónico) obtenido de un depósito y un perfil de acero estructural ASTM A500, donado por los ingenieros encargados del proceso de remodelado en la Universidad de América.

En la Figura 27 y Figura 28 se muestran los materiales utilizados, en la forma como se recibieron antes de ser extraídas las muestras. Para realizar el corte de las probetas se cortó el material inicialmente en placas a partir de la geometría rectangular. Luego de seccionar el material en láminas y hacer un proceso de limpieza se midió el espesor de las placas siendo el del aluminio de 0.72 mm y del acero A500 de 1,90 mm.

Figura 27.

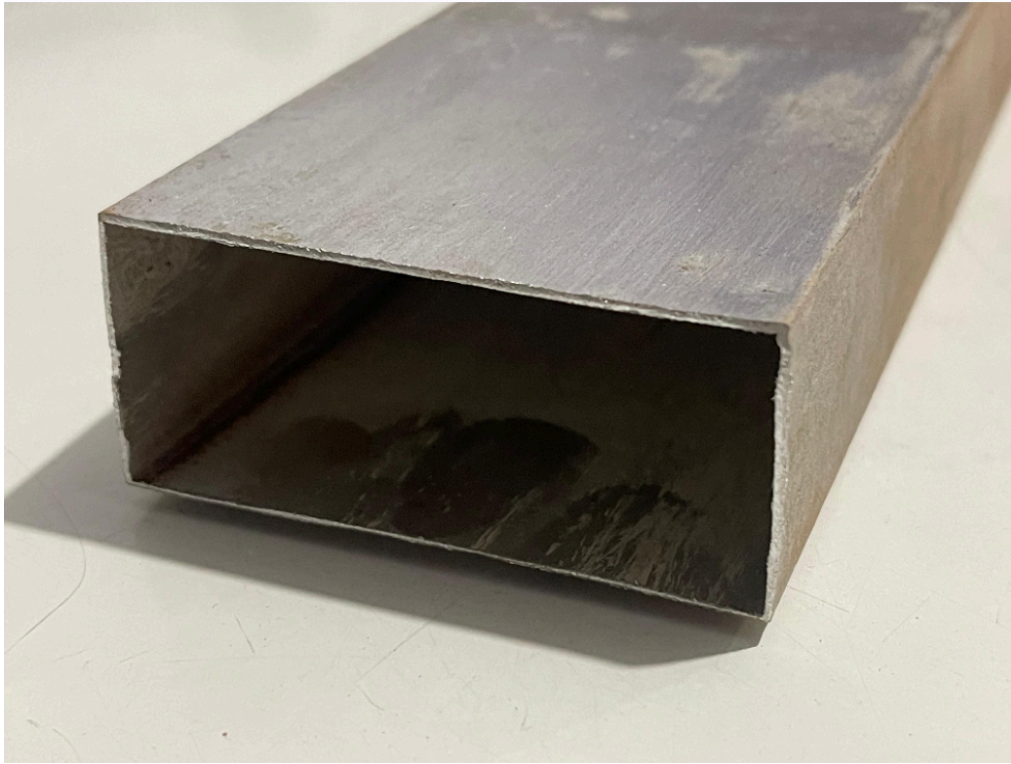
Perfil de acero A500



Nota. Fotografía del acero A500 obtenido de las obras de la Universidad de América.

Figura 28.

Perfil de una aleación de aluminio



Nota. Fotografía del aluminio obtenido de la empresa de reciclado de Bogota D.C.

Para la comprobación del tipo de material de estudio, se realizó un laboratorio de metalografía con el fin de validar el tipo de acero y el tipo de aluminio, con el propósito de corroborar la información que se nos dio por parte de los ingenieros encargados de la remodelación de la universidad y por parte del centro de reciclado que nos aportó el perfil de aluminio.

Para ello extrajimos muestras de cada uno de ellos para crear las probetas, se realizaron tres pruebas para el A500 y dos para la aleación de aluminio, a cada muestra se le realizó el un encapsulamiento en resina para así luego iniciar el proceso de lijado de las muestras con los distintos tipos de lijas, las cuales parten desde la número 80 hasta llegar a la número 1200, esto

se hace para poder resaltar el material e ir disminuyendo las imperfecciones que se tienen antes de preceder al ataque químico.

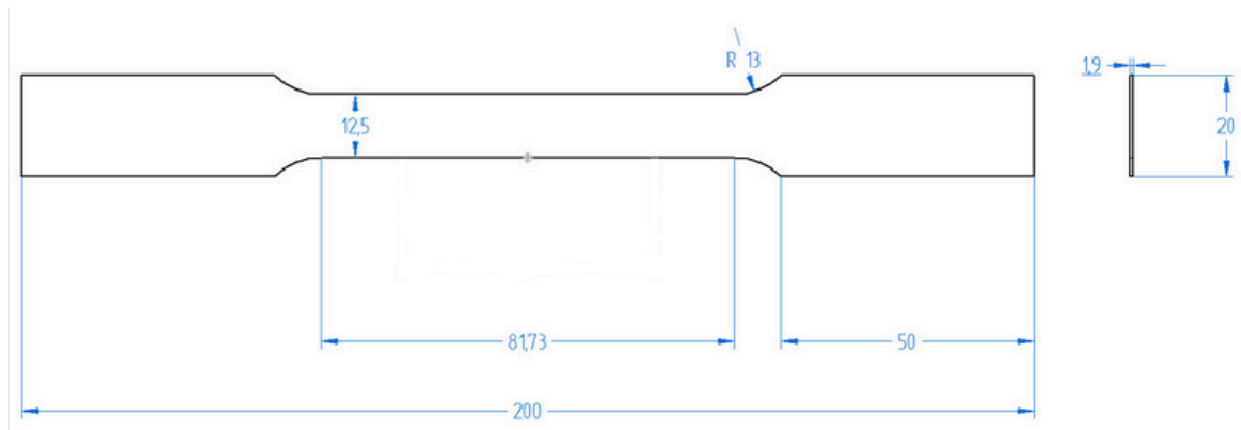
Luego del proceso de lijado se procede a realizar un pulido con más detalle con la ayuda de una máquina especial y alúmina hasta llegar a un acabado tipo espejo, para un mejor resultado se realizó un último pulido con pasta de diamante, lo cual permite extraer un mayor brillo con menos imperfecciones en la cara que se está realizando el acabado de un espejo.

Al obtener la muestra con acabado tipo espejo, se procede a atacar químicamente esta cara para visualizar la microestructura, como se están estudiando dos materiales diferentes fue necesario atacar cada uno con un componente diferente, para el acero A500 se usó Nital y para el aluminio agua regia, estos reactivos permiten resaltar la microestructura de los materiales y así poder caracterizar, validar y comprobar si el tipo de acero que usamos corresponde a serie y tipo, se dejó el ácido en contacto con el material por unos 20 a 30 segundos, luego fue lavado para remover el activo y después secado para montar al microscopio, se ajustó la muestra y se observó el material con ayuda de un lente de aumento de 20 micras para el aluminio y 50 micras para el acero.

Para realizar la fabricación de las probetas de ensayo, se utilizó la herramienta de diseño Solid Edge® para crear el plano, como se ve en la Figura 29 y Figura 30. Las placas de acero y aluminio, con medidas de 220 mm de largo y 120 mm de ancho, fueron cortadas por una empresa especializada en corte láser, para lograr obtener el mayor número de muestras posibles de cada sección. Como se observa en la Figura 31, fueron cortadas ocho muestras de acero y cinco de aluminio para así tener un total de dieciséis probetas de ensayo.

Figura 29.

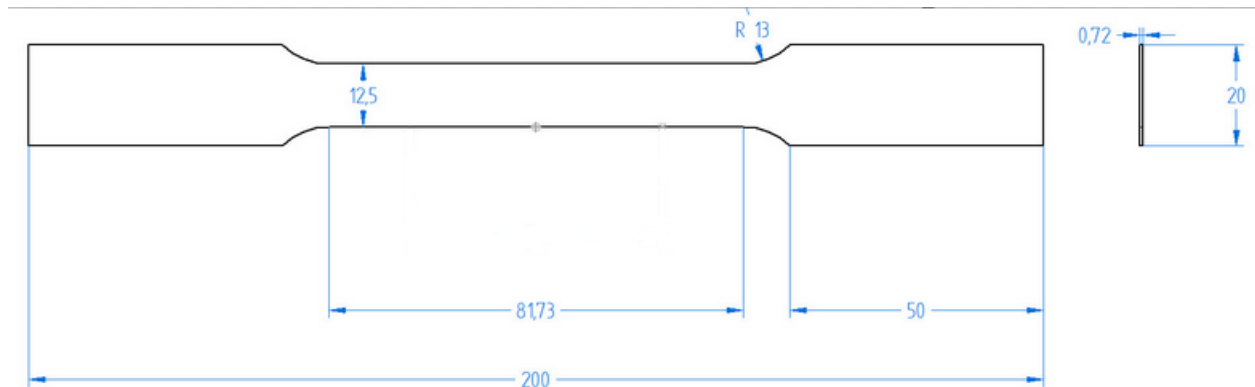
Elaboración de las probetas en Solid Edge para acero.



Nota. Probetas elaboradas en Solid Edge®.

Figura 30.

Elaboración de las probetas en Solid Edge para aluminio.



Nota. probetas elaboradas en Solid Edge®.

Figura 31.

Cortes de las placas de acero y aluminio en láser.

Cortes en placa de acero A500



Cortes en placa de aleación de aluminio

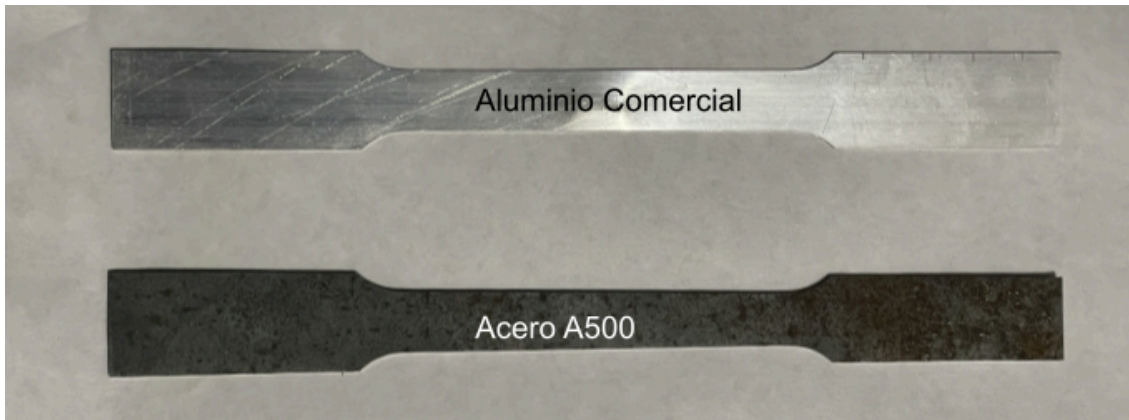


Nota. Foto de las placas con corte láser realizadas por la empresa especializada en corte.

Las probetas fueron fabricadas de acuerdo a las recomendaciones de la normas ASTM E646, con ancho de 20 mm, largo de 200 mm con un espesor de 0,72 mm para el aluminio y 1,90 mm para el acero. En la Figura 32 se pueden observar las probetas terminadas con las medidas recomendadas por la norma.

Figura 32.

Probetas de ensayo de aluminio comercial y acero A500



Nota. Fotografía de las probetas de ensayo creadas a partir de las láminas de aluminio comercial y acero A500.

Los ensayos de tracción se llevaron a cabo en una máquina universal de ensayo de la Universidad de América, marca SHIMADZU modelo AGS-50 kNX. Para el inicio de las pruebas fue necesario llevar a cabo un precalentamiento de los sistemas con el fin de garantizar la ejecución adecuada de las pruebas, donde se procedió con la calibración de la máquina, seguida por la realización de dos ensayos de prueba para ver el comportamiento de la máquina y los parámetros a utilizar.

Para la calibración de la máquina, fue necesario validar los datos de entrada, para ello se ingresaron los valores longitud de la probeta, longitud de la sección transversal, espesor de la probeta, velocidad de la máquina y el tipo de geometría que se usaría, en nuestro caso es una probeta plana para así poder obtener los valores ideales al momento de determinar el coeficiente de endurecimiento por deformación n . (Para los detalles de los valores usados en la máquina revisar anexo 7).

Para poder realizar los ensayos fue necesario preparar las muestras de cada material, lijando los bordes y marcando la zona de elongación G, con un largo de 50 mm, en el material de un tono diferente para así poder visualizar el alargamiento de la zona central de la probeta como se muestra en la Figura 33.

Figura 33.

Probetas de ensayo de aluminio comercial y acero A500 con la zona de elongación demarcada.



Nota. Fotografía de las probetas de ensayo creadas a partir de las láminas de aluminio comercial y acero A500 con la zona de elongación demarcada.

Al montar las probetas a la máquina de ensayo se aseguró que la zona marcada, quedará centrada y sujeta a las mordazas de la máquina, para poder medir la deformación de la probeta después del ensayo. Se calibró la máquina con la máxima carga aplicada posible (50 kN) y la velocidad de ensayo se estableció en 3 mm/min, esta velocidad se encuentra en el rango recomendado por la norma, al finalizar cada uno de los ensayos se hizo medición de la longitud de galga para poder así hacer una diferencia entre la longitud de galga inicial (50mm) y la longitud final para cada probeta, necesaria para encontrar la extensión de la probeta generada por el ensayo de tracción.

Luego de tener estos parámetros establecidos en la máquina de ensayos, se dio inicio a las pruebas de tracción con las muestras de acero ASTM A500, la fuerza axial fue aplicada de manera gradual aumentando constantemente a la muestra generando una deformación elástica que después pasa a ser una deformación plástica hasta llegar a la creación del cuello y la fractura y así continuar el mismo proceso con las siete probetas restantes de acero y las cinco probetas de aleación de aluminio comercial.

Al terminar cada ensayo de tracción, se verificaron los datos suministrados por la máquina, los cuales son la fuerza y el desplazamiento vertical, está entrega los datos en formato de texto (datos brutos), lo cual requirió llevar a cabo una refinación de estos, es decir, fueron importados a un archivo de excel y se procesaron para luego crear los gráficos de fuerza - desplazamiento, aplicando las Ecuaciones 15 y 16.

$$\sigma_{ingenieril} = \frac{Fuerza}{Área} \text{ Ecuación 15}$$

Donde $\sigma_{ingenieril}$ es el esfuerzo ingenieril, la fuerza es el dato proporcionado por la máquina y el área es calculada con las dimensiones de las probetas, para la aleación de aluminio comercial es 9 mm^2 y para el acero ASTM A500 es $23,75 \text{ mm}^2$.

$$\epsilon_{ingenieril} = \frac{Desplazamiento}{Longitud Calibrada} \text{ Ecuación 16}$$

Donde $\epsilon_{ingenieril}$ es la deformación ingenieril, el desplazamiento es el dato proporcionado por la máquina y la longitud calibrada, la cual fue tomada para todas las probetas igual a 50 mm.

La base de datos obtenidos con los resultados anteriores, se obtuvieron las curvas de esfuerzo-deformación real, para este cálculo se usaron las Ecuaciones 17 y 18.

$$\sigma_{real} = \sigma_{ingenieril} (1 + \epsilon_{ingenieril}) \text{ Ecuación 17}$$

Donde σ_{real} es el esfuerzo real, $\sigma_{ingenieril}$ es el esfuerzo ingenieril obtenido a partir de los datos proporcionados por la máquina, y $\varepsilon_{ingenieril}$ es la deformación ingenieril también obtenida a partir de los datos de la prueba.

$$\varepsilon_{real} = \ln(1 + \varepsilon_{ingenieril}) \quad \text{Ecuación 18}$$

Donde ε_{real} es la deformación real y $\varepsilon_{ingenieril}$ es la deformación ingenieril también obtenido a partir de los datos calculados anteriormente.

Por último se tuvo conformada la base de datos con las curvas de cada una de las aleaciones, para luego seleccionar los datos que permitirán determinar el coeficiente de endurecimiento por deformación n (Ecuación 14), esta selección de datos de debe realizar a partir del punto máximo de la curva, la selección debe tener como mínimo siete puntos como recomienda la norma ASTM E646.

La ecuación 12, fue usada para calcular el exponente de endurecimiento por deformación n.

$$n = \frac{N \sum_{i=q}^N (\log \varepsilon_i \log \sigma_i) - (\sum_{i=1}^N \log \varepsilon_i) (\sum_{j=1}^N \log \sigma_j)}{N \sum_{i=1}^N (\log \varepsilon_i)^2 - (\sum_{i=1}^N \log \varepsilon_i)^2} \quad \text{Ecuación 12}$$

Con los datos obtenidos también se encontró el coeficiente de resistencia con la ecuación 13.

$$\log K = \frac{\sum_{i=q}^N (\log \sigma_i) - n \sum_{i=1}^N \log \varepsilon_i}{N} \quad \text{Ecuación 13}$$

Con estos datos se llevó a cabo el cálculo de coeficiente de endurecimiento por deformación usando la ecuación de Hollomon (Ecuación 8) para crear una tabla con todos los pares de datos de los ensayos de cada material, para que pueda ser analizada.

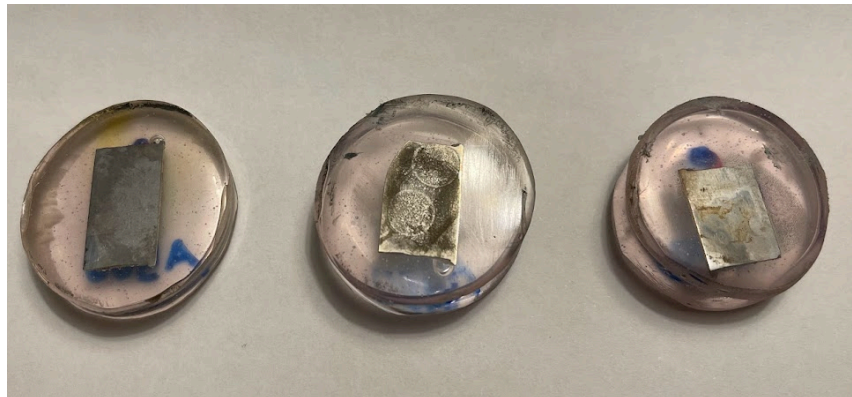
5. RESULTADOS

Los resultados de pruebas de metalografía realizadas en el laboratorio de la Universidad América, fueron analizados para la verificación del tipo de material usado en las pruebas de tracción así como también los resultados de pruebas de tracción realizadas en el laboratorio de la Universidad América, fueron analizados y ordenados de tal forma que permita realizar la determinación del coeficiente de endurecimiento por deformación con ayuda de los datos y mostrados gráficamente en curvas de esfuerzo-deformación, tanto ingenieril como real.

5.1 Ensayo metalográfico para el Acero ASTM A500

Figura 34.

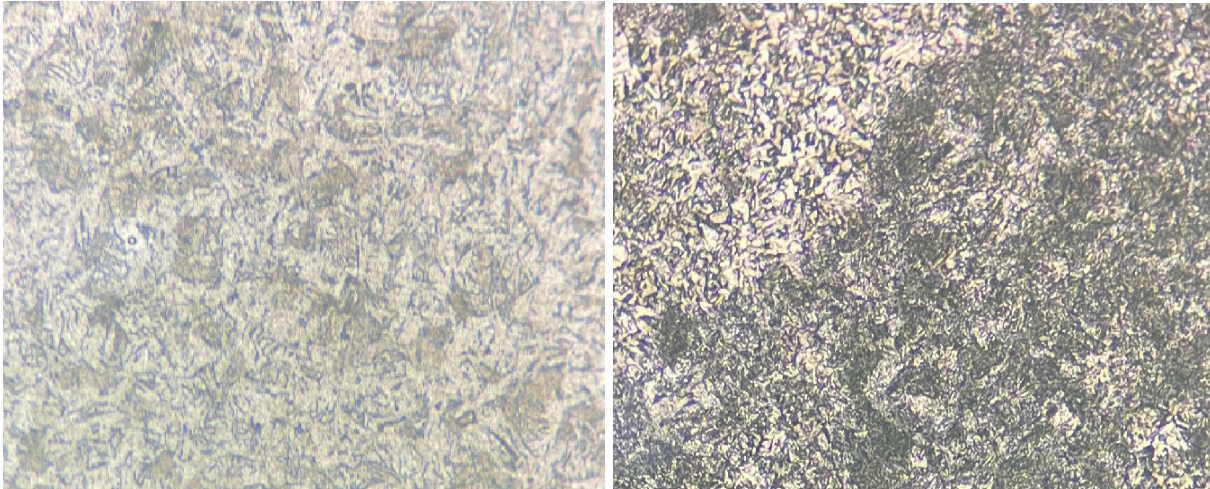
Muestras de las probetas usadas en el laboratorio para el estudio del acero ASTM A500.



Nota. muestras encapsuladas de acero ASTM A500.

Figura 35.

Imagen de la metalografía para el acero ASTM A500

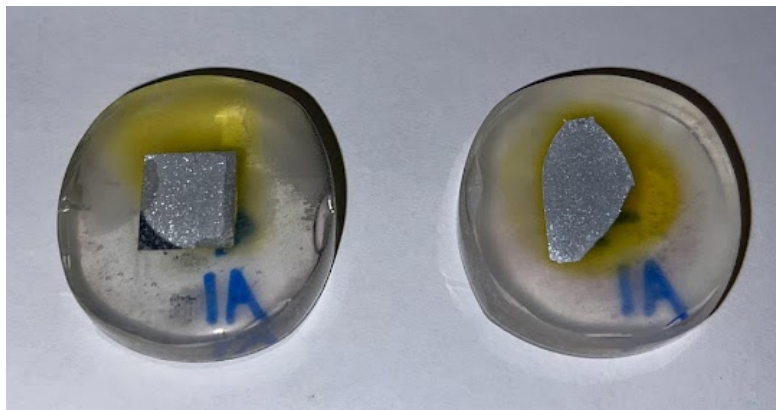


Nota. Microestructura acero ASTM A500 laboratorios Universidad de América.

5.2 Ensayo metalográfico para la aleación de aluminio

Figura 36.

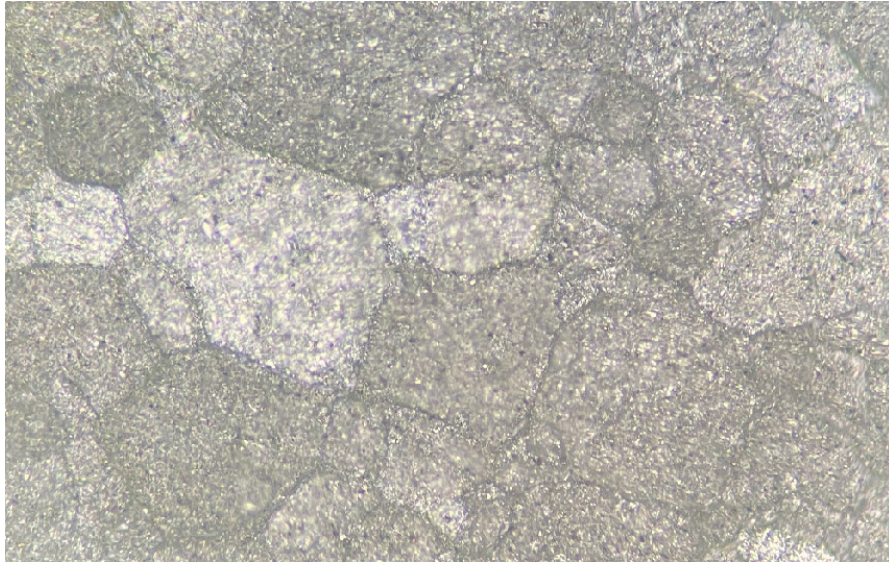
Muestras de probetas usadas en el laboratorio para una aleación de aluminio



Nota. muestras encapsuladas de una aleación de aluminio.

Figura 37.

Imagen de la metalografía para la aleación de aluminio



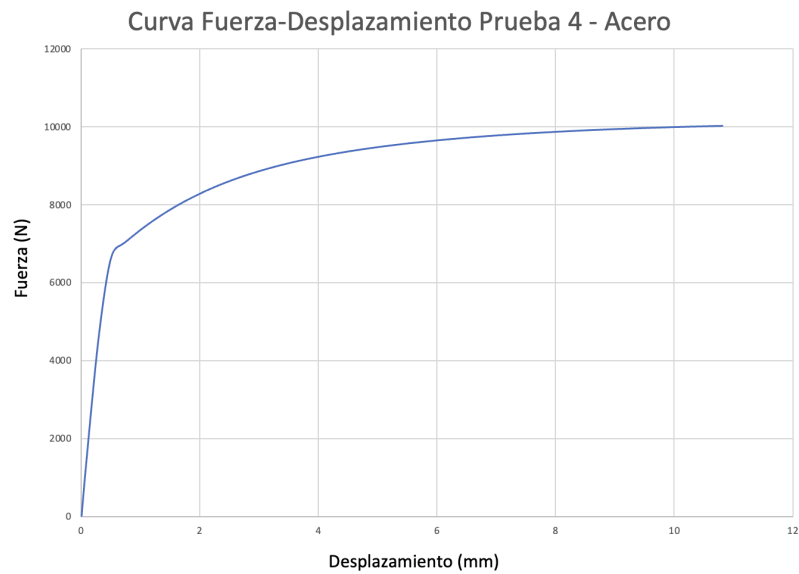
Nota. Microestructura aleación de aluminio en los laboratorios Universidad de América.

5.3 Ensayos en el Acero ASTM A500

En la Figura 38 es presentada la curva de los datos proporcionados por la máquina universal, de la cual se elaboró la gráfica de la Figura 39, que es la curva de esfuerzo - deformación de ingeniería para uno de los ensayos en el acero estructural ASTM A500, es importante destacar que en todos los ensayos se obtuvieron curvas con este mismo comportamiento, como presentado en el Anexo 1. En la figura 40 se presenta la curva esfuerzo deformación real del mismo ensayo mostrado en la Figura 41.

Figura 38.

Curva fuerza - desplazamiento de la prueba de acero ASTM 500



Nota. Imagen de la curva Fuerza - Desplazamiento del cuarto ensayo del Acero ASTM A500.

Figura 39.

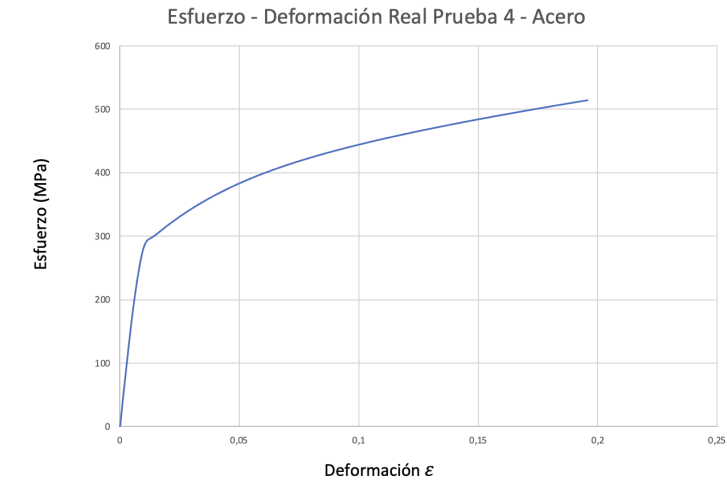
Curva esfuerzo-deformación ingenieril de la cuarta prueba de acero ASTM 500



Nota. Imagen de la curva esfuerzo-deformación ingenieril del cuarto ensayo del Acero ASTM A500.

Figura 40.

Curva esfuerzo-deformación real de la cuarta prueba de acero ASTM 500

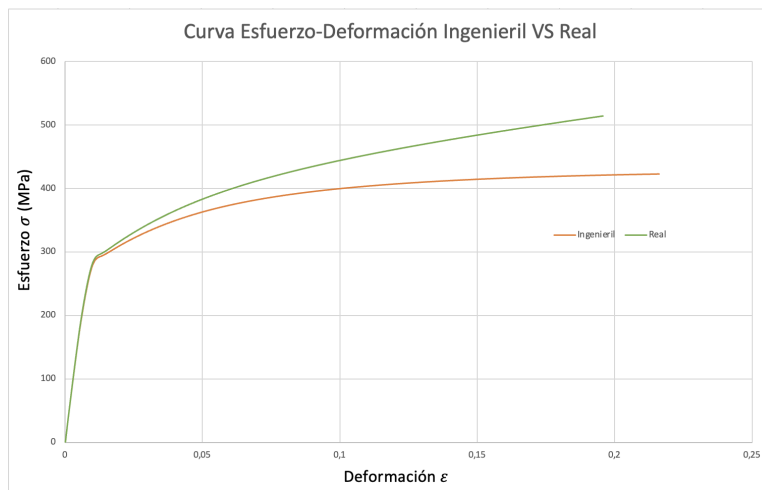


Nota. Imagen de la curva esfuerzo-deformación real del cuarto ensayo del Acero ASTM A500.

Se realizó la comparación de las curvas esfuerzo deformación ingenieril y real obtenidas de los datos extraídos en el ensayo de tracción, como se muestra en la Figura 41.

Figura 41.

Curva esfuerzo-deformación ingenieril y real de la cuarta prueba de acero ASTM 500



Nota. Se presenta una comparación de los gráficos donde la naranja es la curva de esfuerzo deformación ingenieril y la verde es la curva de esfuerzo deformación real.

A partir de la curva de ingeniería para todos los ensayos se determinó esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo y la elongación. Los valores para los ensayos realizados son presentados en la Tabla 11.

Tabla 10.

Tabla de datos obtenidos a partir de la curva de ingeniería para los ensayos de acero ASTM A500.

ACERO ASTM A500					
# Ensayo	Elongación ($\Delta L/L_0$)*100% (%)	Esfuerzo Máx (σ) (MPa)	Deformación Máx (ϵ)	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Longitud Final (mm)
1	24,78	270	0,2197	155	92,39
2	20,54	243	0,2147	145	90,27
3	35,32	265	0,2162	157	97,66
4	39,72	423	0,2162	293	99,86
5	44,76	414	0,2162	288	102,38
6	33,28	414	0,2162	284	96,64
7	31,58	299	0,2162	192	95,79
8	29,50	298	0,2162	194	94,75
Media	32,43	299	0,22	193,03	96,22
Desviación Estándar	7,28	71,54	0,0013	60,67	3,64

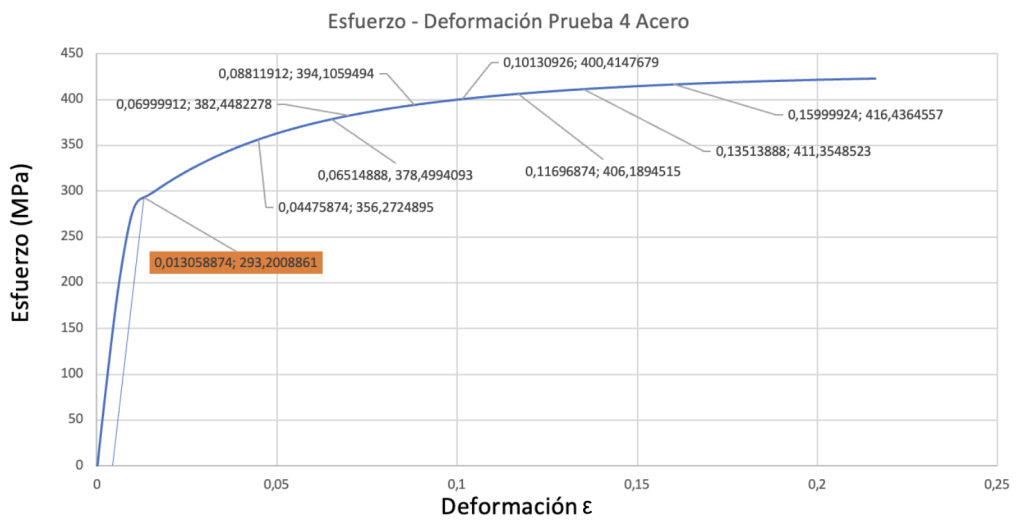
Nota. Tabla del cálculo de módulo de elasticidad, elongación, esfuerzo de fluencia, esfuerzo, deformación máxima, longitud final medida al finalizar el ensayo, la media y desviación estándar para los ocho ensayos realizados en acero ASTM A500.

Para el cálculo del coeficiente de endurecimiento por deformación, la constante de endurecimiento y la desviación estándar de n , se siguió la norma ASTM E 646, la cual pide la selección de mínimo siete pares de datos, entre la fluencia máxima y el esfuerzo máximo, en la

Figura 42 se puede observar la selección de estos pares de datos para uno de los ensayos, en el Anexo 2 se encuentra la selección de datos y los cálculos de n para todos los ensayos.

Figura 42.

Selección de datos de la curva esfuerzo - deformación para un ensayo del acero ASTM A500



Nota. Selección de datos de la curva esfuerzo - deformación de la cuarta prueba de ensayo para el acero ASTM A500.

En la tabla 11 y tabla 12 se presentan las hojas de cálculo utilizadas para determinar los parámetros n y K para el acero ASTM A500.

Tabla 11.

Tabla de datos necesarios para calcular el coeficiente de endurecimiento por deformación.

Par de datos	Carga, F (N)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real, σ, (MPa)	Sección de Ensayo de la Probeta (mm)	Y = log 10 (σ)	Y ²	Extensión mm	Deformación Ingenieril, ε	Deformación Real, ε	X = log 10 (ε)	X ²	XY
1	8.443	356	370	50	2,57	6,59	2,00	0,04	0,04	-1,41	1,98	-3,61
2	8.970	378	397	50	2,60	6,75	2,50	0,05	0,05	-1,31	1,72	-3,41
3	9.064	382	402	50	2,60	6,78	2,65	0,05	0,05	-1,29	1,66	-3,35
4	9.340	393	419	50	2,62	6,88	3,30	0,07	0,06	-1,19	1,43	-3,13
5	9.489	400	432	50	2,64	6,95	4,06	0,08	0,08	-1,11	1,23	-2,92
6	9.627	405	449	50	2,65	7,04	5,41	0,11	0,10	-0,99	0,98	-2,62
7	9.627	405	462	50	2,66	7,10	7,00	0,14	0,13	-0,88	0,78	-2,35
8	9.869	416	470	50	2,67	7,14	6,50	0,13	0,12	-0,91	0,83	-2,44
				Σ	21,02	55,22			Σ	-9,09	10,60	-23,83

Nota. Tabla de datos obtenidos a partir de la guía de la norma ASTM E A646 necesarios para calcular el coeficiente de endurecimiento por deformación en la cuarta prueba del acero ASTM A500.

Tabla 12.

Cálculos para la determinación del coeficiente de endurecimiento por deformación.

Paso 1	-23,88	\bar{X} =	-1,14		
Sxy=	0,05	\bar{y} =	2,63	Paso 9	0,01
Paso 3	10,33	$n\bar{X}$ =	-0,21	Syy=	48,32
Sxx=	0,27	b=	2,83	$S^2 y$ =	8,05
		K (MPa) =	680,41	SDn1 ² =	30,20
n4=	0,18	log K=	2,83	SDn4=	5,50

Nota. Cálculos para la determinación del coeficiente de endurecimiento por deformación a partir de la norma ASTM E 646.

En la Tabla 13 se puede observar el comportamiento del coeficiente de endurecimiento por deformación, la constante de endurecimiento y la desviación estándar de n para los ensayos de las ocho probetas del acero ASTM A500.

Tabla 13.

Coficiente Valores del coeficiente de endurecimiento, constante de endurecimiento y desviación estándar de n.

Coeficiente de endurecimiento por deformación		Constante de endurecimiento (MPa)		Desviación estándar de n
n1	0,24	K1	298	0,022
n2	0,23	K2	441	
n3	0,25	K3	486	
n4	0,18	K4	680	
n5	0,22	K5	715	
n6	0,22	K6	717	
n7	0,23	K7	528	
n8	0,25	K8	560	
Prom	0,23	Prom	553	

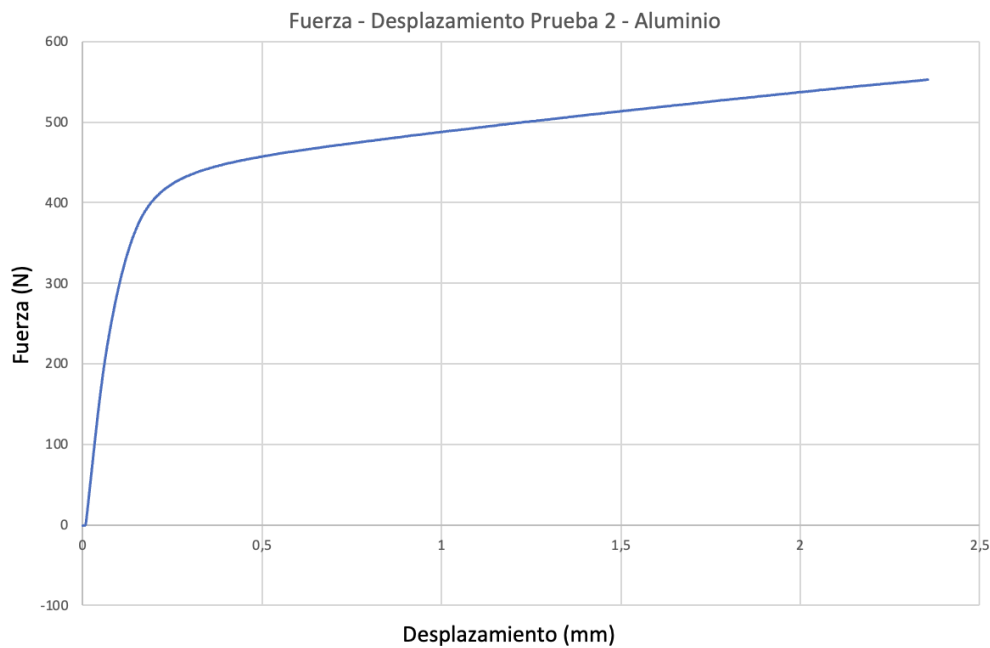
Nota. Compilado de los datos obtenidos en los ensayos de tracción para el ASTM A500.

5.4 Resultados Ensayos Aleación De Aluminio

En la Figura 43 es presentada la curva de los datos proporcionados por la máquina universal, de la cual se creó la Figura 44, que es la curva de esfuerzo - deformación de ingeniería para uno de los ensayos en la aleación de aluminio comercial, es importante destacar que en todos los ensayos se obtuvieron curvas con este mismo comportamiento, como presentado en el Anexo 3. En la Figura 45 se presenta la curva esfuerzo deformación real del mismo ensayo mostrado en la Figura 46.

Figura 43.

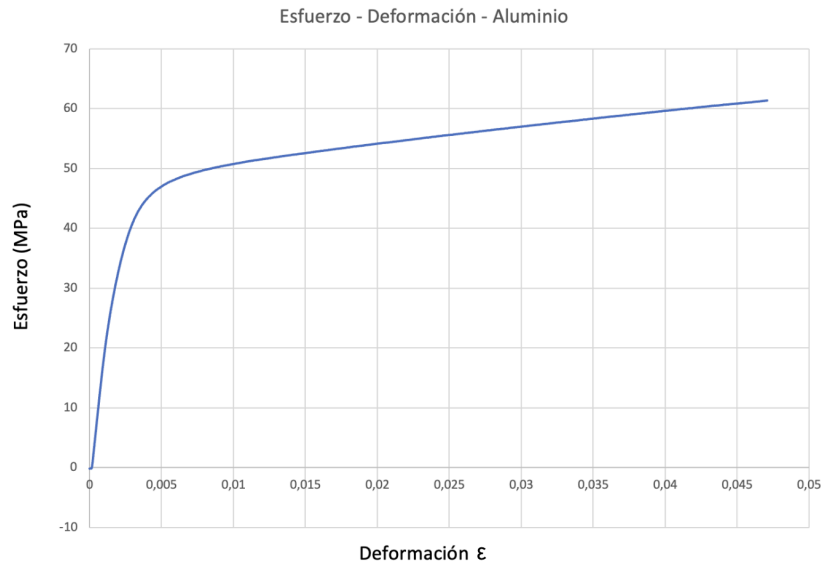
Curva fuerza - desplazamiento de la prueba de aleación de aluminio comercial.



Nota. Imagen de la curva fuerza-desplazamiento del segundo ensayo de la aleación de aluminio comercial.

Figura 44.

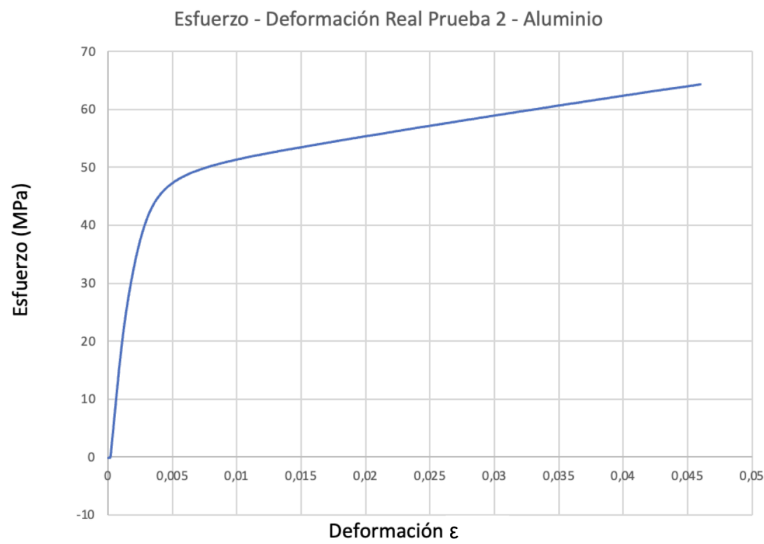
Curva esfuerzo - deformación de la prueba de aleación de aluminio comercial.



Nota. Imagen de la curva esfuerzo-deformación ingenieril del segundo ensayo de la aleación de aluminio comercial.

Figura 45.

Curva esfuerzo - deformación real de la prueba de aleación de aluminio comercial.

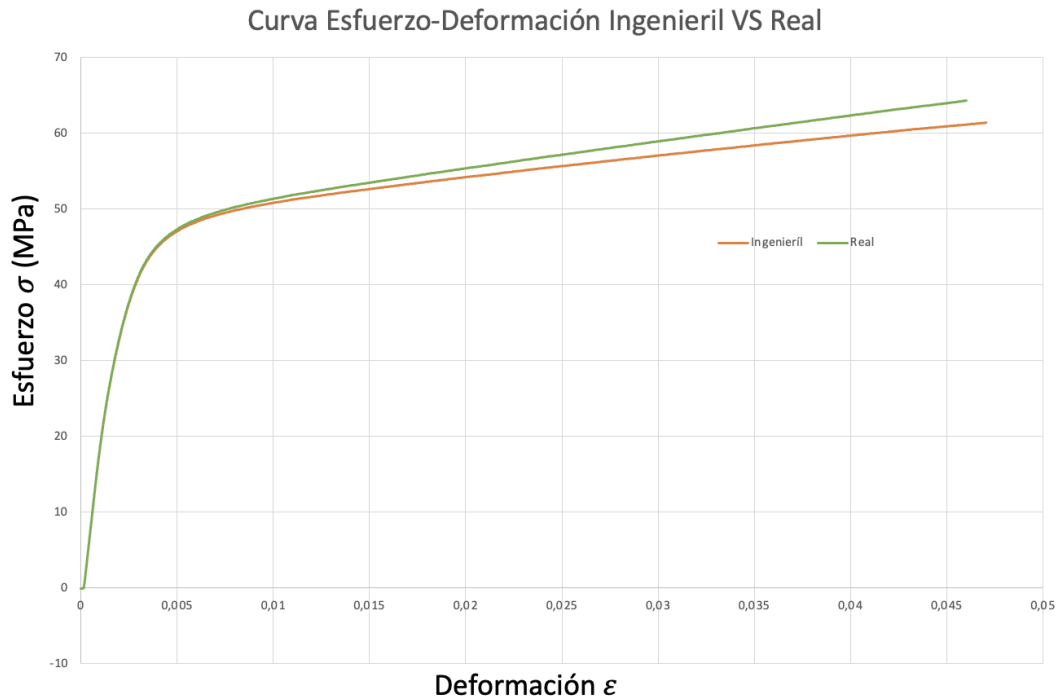


Nota. Imagen de la curva esfuerzo-deformación real del cuarto ensayo de la aleación de aluminio comercial.

Se realizó la comparación de las curvas esfuerzo deformación ingenieril y real obtenidas de los datos extraídos en el ensayo de tracción, como se muestra en la Figura 46.

Figura 46.

Curva esfuerzo-deformación ingenieril y real de la segunda prueba de aleación de aluminio comercial.



Nota. Se presenta una comparación de los gráficos donde la azul es la curva de esfuerzo deformación ingenieril y la naranja es la curva de esfuerzo deformación real.

A partir de la curva de ingeniería para todos los ensayos se determinó, esfuerzo de fluencia, esfuerzo máximo y la elongación. Los valores para los ensayos realizados son presentados en la Tabla 14.

Tabla 14.

Tabla de datos obtenidos a partir de la curva de ingeniería para los ensayos de la aleación de aluminio comercial.

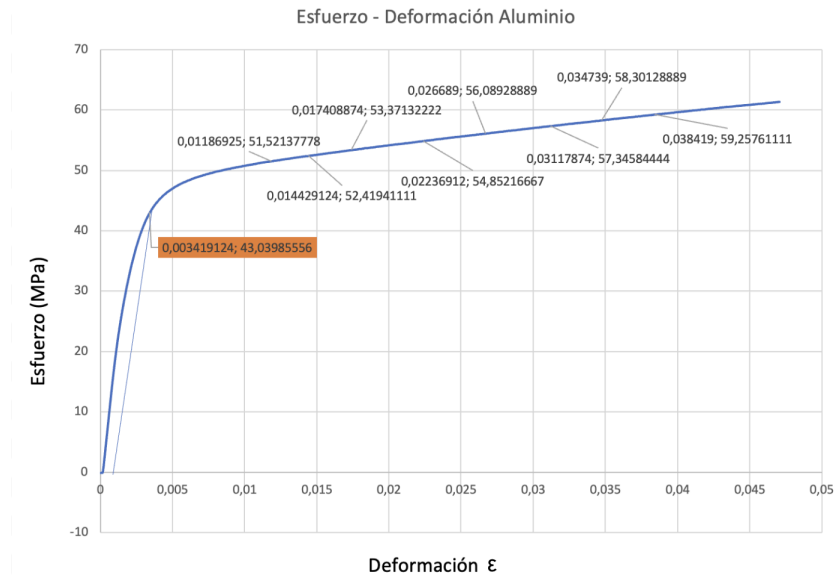
ALEACIÓN DE ALUMINIO					
# Ensayo	Elongación ($\Delta L/L_0$)*100% (%)	Esfuerzo Máx (σ) (MPa)	Deformación Máx (ϵ)	Esfuerzo de Fluencia (MPa)	Longitud Final (mm)
1	13,44	56,12	0,126	33,861	86,72
2	16,24	61,40	0,047100	43,040	88,12
3	14,52	27,56	0,0023091	13,211	87,26
4	13,06	31,78	0,0470989	17,567	86,53
5	15,40	28,08	0,002899	14,038	87,7
Media	14,52	31,78	0,047	17,567	87,26
Desviación Estándar	1,186	15,154	0,045	12,284	0,593

Nota. Tabla del cálculo de módulo de elasticidad, elongación, esfuerzo de fluencia, esfuerzo y deformación máxima para los cinco ensayos realizados en la aleación de acero comercial.

Para el cálculo del coeficiente de endurecimiento por deformación, la constante de endurecimiento y la desviación estándar de n , se siguió la norma ASTM E 646, la cual pide la selección de mínimo siete pares de datos, entre la fluencia máxima y el esfuerzo máximo, en la Figura 47 se puede observar la selección de estos pares de datos para uno de los ensayos, en el Anexo 4 se encuentra la selección de datos y los cálculos para todos los ensayos.

Figura 47.

Curva esfuerzo-deformación, con la selección de datos.



Nota. Imagen de la curva esfuerzo-deformación del aluminio y la selección de los datos para n.

En la tabla 15 y 16 se presentan las hojas de cálculo utilizadas para la determinación de los coeficientes n, K y la desviación estándar, para el aluminio comercial.

Tabla 15.

Tabla de datos necesarios para calcular el coeficiente de endurecimiento por deformación del aluminio.

Par de datos	Carga, F (N)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real, σ, (MPa)	Sección de Ensayo de la Probeta (mm)	Y=log 10 (σ)	Y ²	Extensión, mm	Deformación Ingenieril, ε	Deformación Real, ε	X=log 10 (ε)	X ²	XY
1	464	52	52	50	1,71	2,93	0,59	0,01	0,01	-1,93	3,71	-3,30
2	472	52	53	50	1,72	2,96	0,72	0,01	0,01	-1,84	3,39	-3,17
3	480	53	54	50	1,73	2,98	0,87	0,02	0,02	-1,76	3,10	-3,04
4	494	55	56	50	1,74	3,03	1,11	0,02	0,02	-1,65	2,73	-2,88
5	505	56	58	50	1,75	3,06	1,33	0,03	0,03	-1,58	2,48	-2,75
6	516	57	59	50	1,76	3,09	1,56	0,03	0,03	-1,51	2,27	-2,65
7	525	58	60	50	1,77	3,12	1,74	0,03	0,03	-1,46	2,13	-2,58
8	533	59	61	50	1,77	3,14	1,92	0,04	0,04	-1,42	2,00	-2,51
				Σ	13,94	24,31			Σ	-13,14	21,82	-22,87

Nota. Tabla de datos obtenidos a partir de la guía de la norma ASTM A646 necesarios para calcular el coeficiente de endurecimiento por deformación en la segunda prueba aleación de aluminio.

Tabla 16.

Cálculos para la determinación del coeficiente de endurecimiento por deformación.

Paso 1	-22,90	\bar{X} =	-1,64		
Sxy=	0,03	\bar{y} =	1,74	Paso 9	0,003
Paso 3	21,57	$n\bar{X}$ =	-0,19	Syy=	21,27
Sxx=	0,24	b=	1,94	S ² y=	3,54
		K (MPa) =	86,50	SDn ¹ ²=	14,58
n2=	0,12	log K=	1,94	SDn2=	3,82

Nota. Cálculos para la determinación del coeficiente de endurecimiento por deformación a partir de la norma ASTM E 646 para el segundo ensayo de la prueba de aleación de aluminio.

En la Tabla 17 se puede observar el comportamiento del coeficiente de endurecimiento por deformación y la constante de endurecimiento para los ensayos de las cinco probetas de la aleación de aluminio comercial.

Tabla 17.

Coficiente Valores del coeficiente de endurecimiento, constante de endurecimiento y desviación estándar de n.

Coeficiente de endurecimiento por deformación		Constante de endurecimiento (MPa)		Desviación estándar de n
n1	0,17	K1	78	
n2	0,12	K2	86	
n3	0,23	K3	50	
n4	0,19	K4	52	
n5	0,22	K5	30	
Prom	0,18	Prom	59	

Nota. Compilado de los datos obtenidos en los ensayos de tracción para la aleación de aluminio.

6. ANÁLISIS DE RESULTADOS

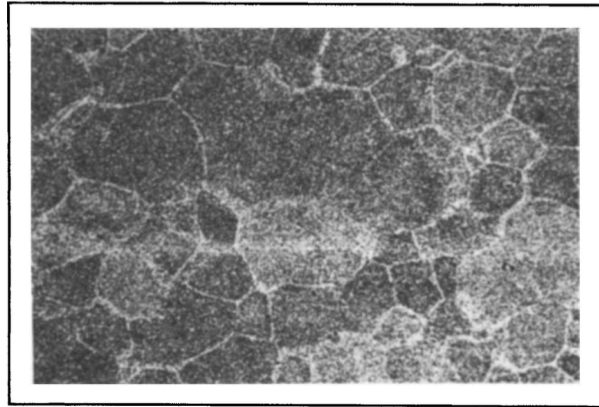
En los resultados de los ensayos de tracción realizados a cada una de las probetas de acero ASTM A500 se encuentran en la literatura que se estudió, es necesario resaltar que el tipo de acero fue nombrado por la empresa de construcción que estaba renovando la Universidad de América, es por esto que se realizó una comprobación del material dado por medio de un análisis metalográfico. Según los datos obtenidos y el estudio que se le realizó al acero ASTM A500 los análisis obtenidos en las pruebas de tracción muestran una pequeña variación según lo encontrado en la literatura, pero los valores se encuentran en el rango esperado.

Según el resultado obtenido en la Figura 35 y comparándolo con la Figura 24 la metalografía del acero estudiado presenta correlación con la literatura estudiada del acero ASTM A500, al ver la estructura que presenta y a la geometría de ésta, se confirma que el estudio fue realizado en un acero ASTM A500.

El propósito del análisis de la microestructura del aluminio fue debido a que no se conocía el grupo al cual hacía parte, luego de realizar el estudio y según los datos extraídos del ensayo se hizo una comparación de la Figura 36 con la Figura 48 y 49, donde se concluye que esta aleación de aluminio está presente en el grupo de los 6XXX, esto por el tamaño de geometría del grano y por la dispersión de la malla que se tiene, a pesar de no realizar un análisis de composición química se comparó con la literatura encontrada.

Figura 48.

Microestructura de aleación de aluminio perteneciente al grupo de los 6XXX.



Nota. Imagen de la microestructura de aleación de aluminio perteneciente al grupo de los 6XXX. Obtenido de Hatch, J. (1984) Aluminum: Properties and Physical Metallurgy. Aluminum Association Inc. and ASM International. USA. [27].

Figura 49.

Microestructura de aleación de aluminio perteneciente al grupo de los 1XXX.



Nota. Imagen de la microestructura de aleación de aluminio perteneciente al grupo de los 1XXX. Obtenido de Montazeri-Pour, M., Parsa, M. H., Jafarian, H. R., & Taieban, S. (2015). Microstructural and mechanical properties of AA1100 aluminum processed by multi-axial incremental forging and shearing. Materials Science & Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing, 639, 705–716. [28].

Al realizar el estudio de los datos de los ensayos de tracción del acero ASTM A500 por la máquina universal, es necesario notar que existen variaciones en las medidas causadas por la falta del extensómetro, por ende exponemos una discrepancia en los datos que se extrajeron del material, ya que no se pudo determinar de forma exacta todas las propiedades mecánicas y es también necesario mencionar que el material de estudio presentaba corrosión y desgaste en su sección transversal lo que pudo incurrir en los datos obtenidos.

El valor de n que se encontró al realizar el estudio del acero ASTM A500 se encuentra entre 0,18 y 0,25 como se mostró en la Tabla 9 el coeficiente de endurecimiento por deformación se encuentra en el rango del coeficiente para los aceros estructurales con una diferencia porcentual respecto a la literatura del 18% - 22%.

Los valores de K se encuentra fuera del rango de los aceros presentados dentro de la literatura estudiada, con una diferencia porcentual del 61% , es importante notar que para los ensayos de tracción basados en la norma ASTM E646 se hace uso de un extensómetro y para este proyecto fue utilizado el desplazamiento del cabezal de la máquina universal para la medición de la deformación, lo que conlleva un porcentaje de error, ya que los datos fueron calculados de acuerdo a lo que menciona la norma. La desviación estándar obtenida de los datos experimentales puede también atribuirse a esta limitación de no contar con el instrumento de medida, generando una variación en el cálculo de la deformación que afecta el cálculo de los demás datos.

Al observar los datos experimentales de esfuerzo y compararlos con con las especificaciones técnicas de la tubería estructural de grado C [29], se identifica que según estas especificaciones de esfuerzo máximo para este tipo de acero debe estar entre 230 MPa y 345 MPa [29] y los resultados obtenidos en las pruebas tiene un esfuerzo máximo entre 243 MPa y 423 MPa. Por otro lado, el esfuerzo de tracción mínimo tiene una desviación leve pero significativa, ya que según la literatura este dato debe estar en un rango de 310 MPa a 400 MPa [29] y en los datos experimentales se encuentra alrededor de 380 MPa.

Para los datos de elongación obtenidos de los ensayos, se encuentra que estos están dentro de los parámetros dados en la literatura, donde se menciona que este material tiene un rango de elongación de un 20% a 25% y el promedio obtenido de los datos experimentales está en un 21%, estos valores corresponden a la desviación estándar de la medida que se encontró en los ensayos luego de ser terminados, para el acero corresponde un valor de 0.02 en relación a los resultados de las pruebas.

Tabla 18.

Comparación de datos experimentales con literatura para el acero

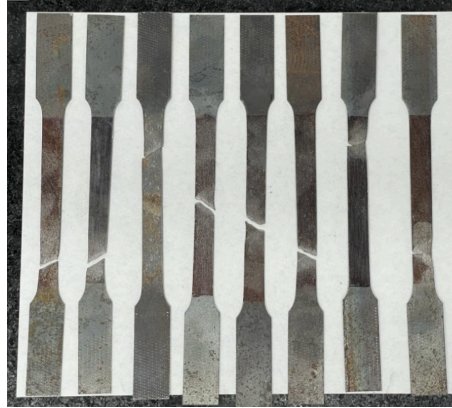
	n (Literatura)	n (Experimental)	Elongación (Literatura)	Elongación (Experimental)	Resistencia a la fluencia (Literatura)	Resistencia a la fluencia (Experimental)
Min	0.171	0,18	20%	20,54%	230 MPa	243 MPa
Max	0.201	0,25	25%	35,32%	345 MPa	423 MPa
Prom	0.188	0,23	22.5%	21%	287.5 MPa	293 MPa

Nota. Comparación de datos de n, elongación y resistencia a la fluencia según los ensayos realizados y la comparación en la literatura.

Como se puede observar en la Figura 50 otro punto a destacar en los ensayos realizados es que el comportamiento del material al momento de llegar a la fractura ya que genera una variación en la orientación de la fractura, estas variaciones pueden estar asociadas a las imperfecciones que se encuentran a nivel estructural del acero y su conformado, por otro lado el material que se estudió presentaba anomalías en la homogeneidad dado que se encontraba a la intemperie previo a la creación de las probetas. En la Figura 51 y en el Anexo 5 se pueden observar cada una de las probetas después de la fractura.

Figura 50.

Probetas de acero ASTM A500 después de la fractura.



Nota. Imagen de la dirección de fractura de las probetas de acero A500.

Figura 51.

Probeta de acero ASTM A500 después de la fractura.



Nota. Imagen de la dirección de fractura de la probeta del primer ensayo de acero A500.

En los resultados de los ensayos de tracción realizados a cada una de las probetas de la aleación de aluminio se encuentran algunas variaciones al compararlas con la literatura que se estudió, debido a que los análisis de datos arrojan una variación a comparación de los que se encuentran.

Por otro lado, el aluminio que se estudió presentaba un desgaste mayor al que se esperaba, por lo tanto los datos que se obtuvieron en los ensayos se encuentran con dispersión.

El valor de n que se encontró al realizar el estudio de la aleación de aluminio se encuentra entre 0,12 y 0,23, con un promedio de 0,18 como se mostró en la Tabla 9, el coeficiente de endurecimiento por deformación se encuentra en el rango del coeficiente para las aleaciones de aluminio, ya que es un coeficiente bajo a comparación del acero, con una diferencia porcentual con respecto a la literatura de 4%.

Los valores de K se encuentra fuera del rango de las aleaciones presentados dentro de la literatura estudiada, con una diferencia porcentual de 73%, es importante notar que para los ensayos de tracción basados en la norma ASTM E 646 se hace uso de un extensómetro y para este proyecto fue utilizado el desplazamiento del cabezal de la máquina universal para la medición de la deformación, lo que conlleva un alto porcentaje de error ya que los datos fueron calculados de acuerdo a lo que menciona la norma; la alta desviación estándar obtenida de los datos experimentales puede también atribuirse en gran medida a esta limitación de no contar con el extensómetro, generando un error en el cálculo de la deformación que afecta el cálculo de los demás datos.

Al observar los datos experimentales de esfuerzo y compararlos con con las especificaciones técnicas del aluminio [30], se identifican discrepancias sustanciales, ya que según estas especificaciones la resistencia a la fluencia mínimo para este tipo de acero debe estar entre 24 MPa y 32 MPa [29], los resultados obtenidos en las pruebas tiene un esfuerzo de fluencia entre 13,2 MPa y 43,04 MPa, con una media de 17.56 MPa, se analizó que una posible razón por la que los datos tienen desviaciones inesperadas en su comportamiento es debido al desgaste del material y las condiciones en las que se presentaba. Es necesario destacar que los datos de elongación obtenidos de los ensayos se encuentran dentro de los parámetros dados en la literatura donde se menciona que este material tiene un rango de elongación de un 8% a 15% y el promedio obtenido de los datos experimentales está en un 9%, ,estos valores corresponden a la

desviación estándar de la medida que se encontró en los ensayos luego de ser terminados, para el aluminio corresponde un valor de 0.043 en relación a los resultados de las pruebas.

Tabla 19.

Comparación de datos experimentales con literatura para el aluminio

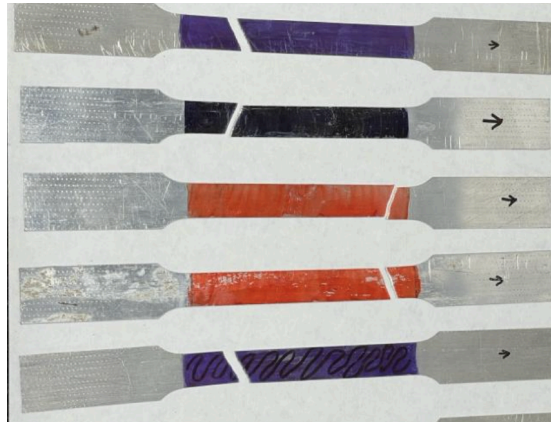
	n (Literatura)	n (Experimental)	Elongación (Literatura)	Elongación (Experimental)	Resistencia a la fluencia (Literatura)	Resistencia a la fluencia (Experimental)
Min	0,07	0,12	8%	13,44%	24 MPa	13,2 MPa
Max	0,23	0,23	15%	16,24%	32 MPa	43,04 MPa
Prom	0.16	0,18	11.5%	15%	28 MPa	17,56 MPa

Nota. Comparación de datos de n, elongación y resistencia a la fluencia según los ensayos realizados y la comparación en la literatura.

Según los resultados obtenidos se puede hacer una estimación de que aleación de aluminio fue la tratada en los ensayos de tracción, teniendo en cuenta que no se conoce el porcentaje de composición química del aluminio podemos decir que hace parte de una aleación no tratada térmicamente que sería la serie 1100 o de la serie de los 6XXX. Como se puede observar en la Figura 52, otro punto a destacar en los ensayos realizados es que el comportamiento del material al momento de llegar a la fractura, generando variación en la orientación de la fractura, estas variaciones pueden estar asociadas a las imperfecciones que se encuentran a nivel estructural del aluminio y su conformado, por otro lado el material que se estudió presentaba anomalías en la homogeneidad del material, debido a que fue un material que estaba listo para ser reciclado. En la Figura 53 y en el Anexo 6 se pueden observar cada una de las probetas después de la fractura.

Figura 52.

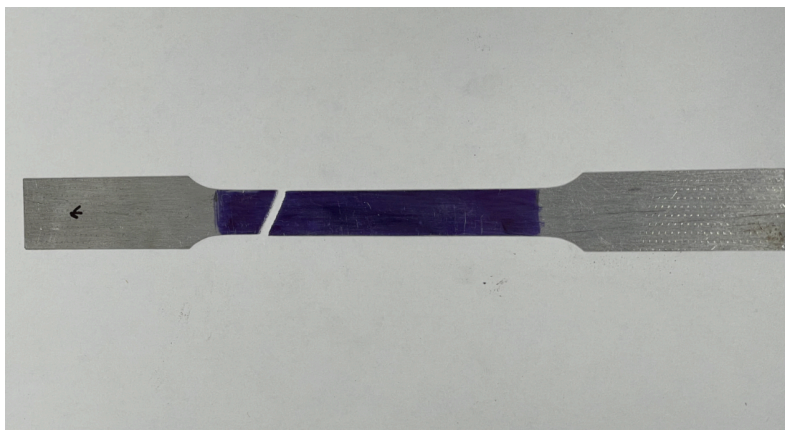
Probetas de la aleación de aluminio estructural después de la fractura.



Nota. Imagen de la dirección de fractura de las probetas de la aleación de aluminio estructural.

Figura 53.

Probeta de la aleación de aluminio estructural después de la fractura.



Nota. Imagen de la dirección de fractura de las probetas del segundo ensayo de aleación de aluminio estructural.

Como consideración final en este proyecto se proponen algunas recomendaciones para generar proyectos y generar acciones para implementar este tipos de ensayos en la universidad de América. Inicialmente se recomienda conformar un grupo de estudio en el semillero de

investigación en diseño avanzado para profundizar en las temáticas y ensayos en los laboratorios de la Universidad de América, por otro lado se espera seleccionar materiales en los cuales se pueda comprobar el acabado superficial garantizando que no hay presencia de defectos e imperfecciones superficiales que generan dispersión en los ensayos realizados. Se sugiere adicionar un proceso análisis metalográfico en los materiales estudiados para realizar la correlación entre los parámetros encontrados y las microestructuras, es importante destacar que en la delimitación del presente proyecto no se tenía contemplado este tipo de análisis, sin embargo se puede generar una nueva área de estudio para la realización de proyectos futuros.

Para terminar con el análisis que se realizó a cada uno de los materiales, se desarrollaron una serie de procesos necesarios para obtener los datos a estudiar, entre los cuales se encuentran los ensayos de tracción, que permitió encontrar los datos de deformación, esfuerzo de fluencia y elongación.

Es necesario resaltar que los materiales no presentaban alguna caracterización por lo cual se le realizó la metalografía para así poder tener una idea de las características de los materiales y clasificar los datos mostrados a lo largo de las pruebas de tracción, es por esto que también con el análisis óptico usado para determinar el tipo de material estudiado con las pruebas de metalografía, se evidencio como lo mostrado en el análisis de resultados que fue posible hacer la comparación de las microestructuras de los materiales estudiados con la literatura encontrada, esto demostró que efectivamente estamos hablando de un acero A500 y permito la caracterización del tipo de aleación de aluminio que fue recibido del centro de reciclado, como muestra de ello se estudió el material en torno al análisis de tamaño de grano y distribución haciendo una comparación con la literatura, con esto permitió encontrar que el acero ASTM A500 muestra características ideales para encontrarse en el grupo de aceros estructurales y en el grado C, por otro lado el aluminio presento unas características diferentes a las encontradas en la literatura, por ello se requirió un mayor análisis metalográfico y mayor búsqueda en la literatura debido a que no se podía confirmar de qué grupo y serie era este, luego de parametrizar de mejor manera se llegó a la conclusión de que el aluminio se encontraba en la serie de los 1XXX y

6XXX por los análisis desarrollados y así dar respuesta a los datos que se obtuvieron a lo largo de las pruebas. Al conocer esta información es posible afirmar que aunque algunos datos están fuera de los rangos de la literatura, el problema de esta desviación radicó en el desgaste o la exposición a la intemperie de los materiales y en la falta del extensómetro para tener los datos exactos, lo que generó un error humano, y gracias a estas pruebas que fueron realizadas para ambos materiales se pudo calcular y conocer el coeficiente de endurecimiento por deformación del acero y de la aleación aluminio dando culminación al objetivo trazado del cálculo de este coeficiente.

7. CONCLUSIONES

Según los resultados experimentales que se obtuvieron en el ensayo de tracción, se resalta la importancia de considerar y verificar con mayor rigurosidad las condiciones de las herramientas y condiciones iniciales para los ensayos de tracción en el laboratorio para así obtener mejores resultados en las pruebas que se realicen.

La metalografía permitió estudiar la estructura de los materiales para comprender su comportamiento, ya que es una herramienta indispensable para garantizar la calidad del material, el rendimiento de este y analizar posibles fallos en la estructura.

Los ensayos de tracción son una herramienta amplia de investigación, que permite el estudio de los materiales y su comportamiento mediante las curvas de esfuerzo - deformación que permiten evaluar y determinar factores esenciales para el comportamiento del material dando respuesta a incógnitas que se presentan a la hora de realizar proyectos o investigaciones que no tienen datos que los soportan para llevarse a cabo, validando la decisión a tomar y contribuyendo al avance.

El estudio que se realizó gracias a las instalaciones de la Universidad de América permitió la realización de la práctica propuesta, con el fin de proveer información valiosa la cual podrá ser usada para prácticas de laboratorio o estudios futuros por los estudiantes de las facultades de la universidad.

Los valores obtenidos del coeficiente de endurecimiento por deformación n en el acero estudiado muestra una relación con la literatura especializada dándonos un promedio de n de 0.23 y la del aluminio de 0.18, en la aleación de aluminio se presentó una dispersión no tan marcada según la literatura estudiada, esto sugiere la realización de un mayor número de ensayos con mayor control en las condiciones iniciales y así precisar los datos que se extraerán del material.

Con base en los resultados obtenidos, se confirma que el acero tiene una dureza mayor que la del aluminio, como lo demuestra un factor de deformación significativamente mayor según los datos recopilados en los ensayos. Esta diferencia resalta la superioridad del acero en términos de

resistencia y durabilidad, respaldando su preferencia en aplicaciones donde se requiere una resistencia mecánica mayor.

El presente trabajo permitió iniciar el estudio profundo de las propiedades mecánicas de aleaciones, abriendo una línea de estudio que puede ser seguida por otros estudiantes en la Universidad de América.

BIBLIOGRAFÍA

- [1] Hosford, William F., Caddell, Robert M., (2011). Metal Forming: Mechanics and Metallurgy, 4th Edition, Cambridge University Press, USA.
- [2] Stewart, M. (2021). Materials of construction. En M. Stewart (Ed.), Surface Production Operations (pp. 61–92).
- [3] Brockenbrough, Roger L. (2020). EFFECT OF COLD WORK ON TENSILE PROPERTIES. Chap. 1.9 in Structural Steel Designer's Handbook. 6th ed., edited by Roger L. Brockenbrough and The late Frederick S. Merritt. New York: McGraw-Hill Education. Education.
- [4] Wallerstein, D., Riveiro, A., Val, J. del, Comesaña, R., Lusquiños, F., & Pou, J. (2021). Developments in laser welding of aluminum alloys. En J. Paulo Davim, K. Gupta, K. Gupta, & J. Paulo Davim (Eds.), Advanced Welding and Deforming (pp. 127–150).
- [5] Dieter, George, E., (1961) Mechanical Metallurgy. Chap.5-9 Strain Hardening and Cold Work. MCGRAW-HILL BOOK COMPANY, USA, PA.
- [6] Callister, W. D., & Rethwisch, D. G. (2018). Materials Science and Engineering: An Introduction. John Wiley & Sons. 10th Edition, USA.
- [7] Gere, James M., Goodno, Barry J. (2009) Mecánica de materiales, séptima edición. Cengage Learning Editores, S.A. Cap. 1 Tensión, Compresión y Cortante.
- [8] P. Beer, Ferdinand; Johnston, Jr., E. Russell; DeWolf, John T., Mazurek, David F. (2013) Mecánica de Materiales, 6ta edición. MCGRAW-HILL/INTERAMERICANA EDITORES, S.A.

[9] Hibbeler, Russel C. (2011). Mecánica de materiales, octava edición. Pearson Education, Inc. Capítulo 3, propiedades mecánicas.

[10] ASTM International, (2022). ASTM E8/E8M, Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials¹ (n-Values) of Metallic Sheet Materials. West Conshohocken, USA, PA.

[11] Askeland, D. R., & Fulay, P. P. (2011). Ciencia e ingeniería de materiales, 6ta edición. Cengage Learning.

[12] Hall, E. O. (1970) Yield Point Phenomena In Metals and Alloys, 1st Edition. Plenum Press. 1.1 Introduction. USA.

[13] Lehto, P. (2021). Adaptive domain misorientation approach for the EBSD measurement of deformation induced dislocation sub-structures. Volumen 222.

[14] S. Kalpakjian and S. R. Schmid, *Manufactura, ingeniería y tecnología*, 5a ed. PEARSON EDUCACIÓN, México, 2008.

[15] Gupta, R. K.; Mathew, Christy; Ramkumar, P. (2015). Strain Hardening in Aerospace Alloys. *Frontiers in Aerospace Engineering*, Vol. 4 No. 1

[16] Zhang, Z., Zhao, W., Zhang, Z. et al. New formula relating the yield stress-strain with the strength coefficient and the strain-hardening exponent. *J. of Materi Eng and Perform* 13, 509–512 (2004).

[17] Matusevich, Ariel & Massa, Julio & Mancini, Reinaldo. (2012). Computation of Tensile Strain-Hardening Exponents through the Power-Law Relationship. *Journal of Testing and Evaluation*.

- [18] Chaur Bernal, J. Optimización aplicada al diseño mecánico. (1999). Bogotá, Colombia.
- [19] ASTM International, (2016). ASTM E646-16, Standard Test Method for Tensile Strain-Hardening Exponents (n-Values) of Metallic Sheet Materials. West Conshohocken, USA, PA.
- [20] UNITED STEEL INDUSTRY Member Of USI Group ASTM A500 para tubería estructural de acero al carbono soldada y sin costura conformada en frío.
<https://www.united-steel.com/es/newsshow/363.html>
- [21] Morrison, Machel. (2018). A DUCTILE FUSE FOR SPECIAL CONCENTRICALLY BRACED FRAMES. 10.18057/ICASS2018.
- [22] Salazar, A. Vargas, L. (2009). Evaluación de la resistencia a la fatiga de la aleación de aluminio AA-6061 sometidas a temperaturas de trabajo de 175°C y 225°C.. Universidad de Carabobo. Naguanagua.
<http://mriuc.bc.uc.edu.ve/bitstream/handle/123456789/7157/asalazar.pdf?sequence=1>
- [23] Zhang, Z., Zhao, W., Sun, Q. et al. (2006) Theoretical calculation of the strain-hardening exponent and the strength coefficient of metallic materials. J. of Materi Eng and Perform 15, 19–22.
- [24] Volosevich, P. Y., & Shiyan, A. V. (2015). Stress concentration and strain hardening in structural steel. Steel in Translation, 45(6), 460–465.
- [25] Ziegler, D., Pedraza, J., Berge, G., Insausti, J., Lucaioli, A., Monesterolo, P., Puccinelli, M. (2018) Relación Entre Parámetros Mecánicos Y Curvas Límite De Conformado De Chapas De Acero De Bajo Carbono. Univ. Nacional del Sur, Argentina.

[26] Zhang, J., Ding, H., Wang, C., Zhao, J., & Ding, T. (2013). Work hardening behaviors of a low carbon Nb-microalloyed Si-Mn quenching-partitioning steel with different cooling styles after partitioning. *Materials Science & Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, 585, 132–138.

[27] Hatch, J. (1984) *Aluminum: Properties and Physical Metallurgy*. Aluminum Association Inc. and ASM International. USA.

[28] Montazeri-Pour, M., Parsa, M. H., Jafarian, H. R., & Taieban, S. (2015). Microstructural and mechanical properties of AA1100 aluminum processed by multi-axial incremental forging and shearing. *Materials Science & Engineering. A, Structural Materials: Properties, Microstructure and Processing*, 639, 705–716.

[29] Panelco. (2023) Tubería estructural ASTM 500 Grado C
https://panelco.com.co/catalogo/estructurales-tuberia-astm-500_2020.pdf

[30] Gabrian. (2019) Aluminio 6061: Conozca sus Propiedades y Usos.
<https://www.gabrian.com/es/aluminio-6061-conozca-sus-propiedades-y-usos/>

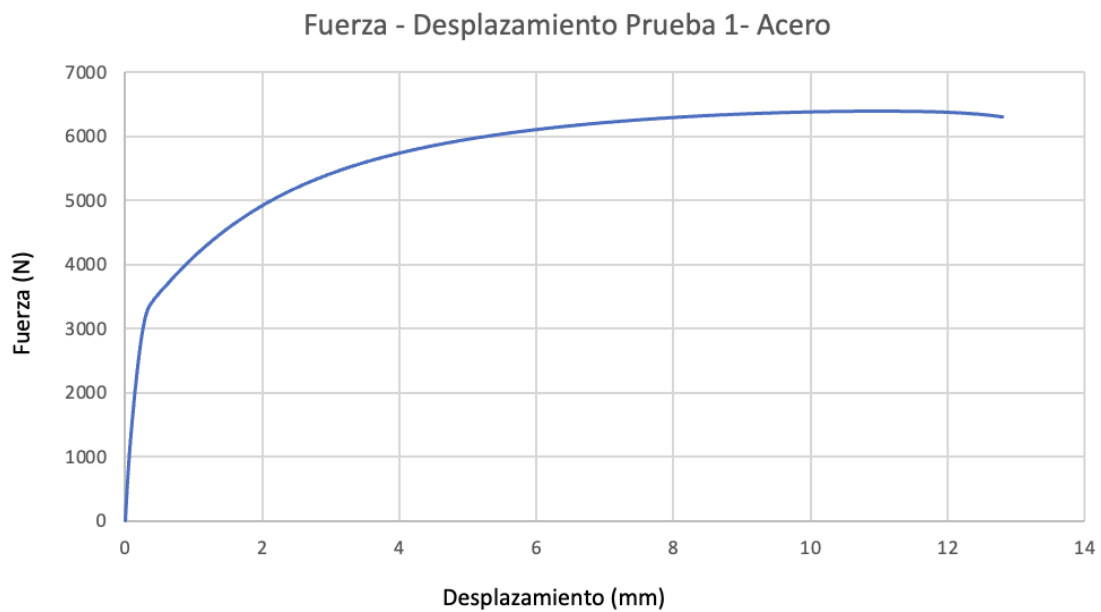
ANEXOS

ANEXO 1. RESULTADOS ENSAYOS ACERO ASTM A500

En este anexo se muestran las curvas obtenidas a partir de los datos proporcionados por la máquina de ensayos para el acero ASTM A500.

Figura 54.

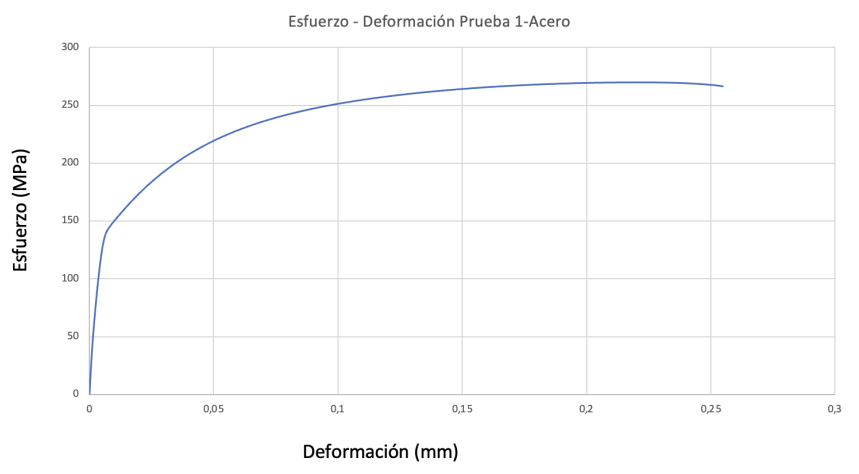
Curva fuerza - desplazamiento para la primera prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva fuerza-desplazamiento del primer ensayo del acero ASTM A500.

Figura 55.

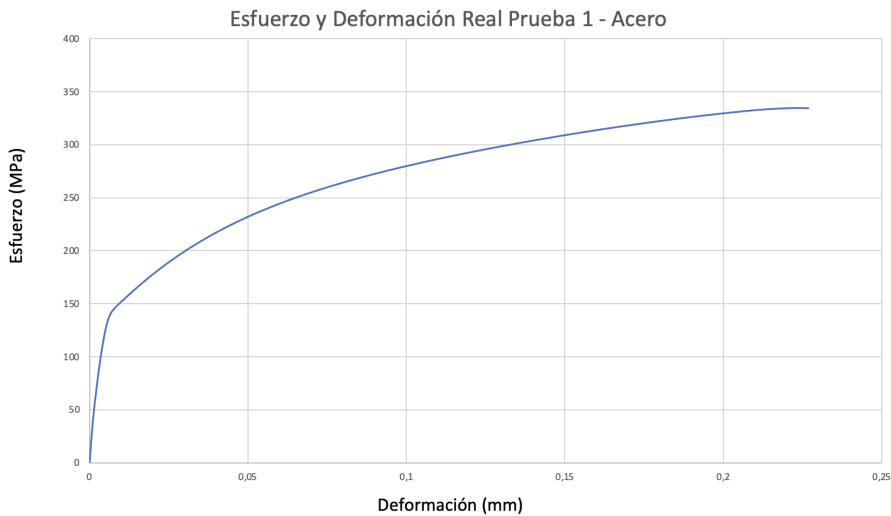
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la primera prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación del primer ensayo del acero ASTM A500.

Figura 56.

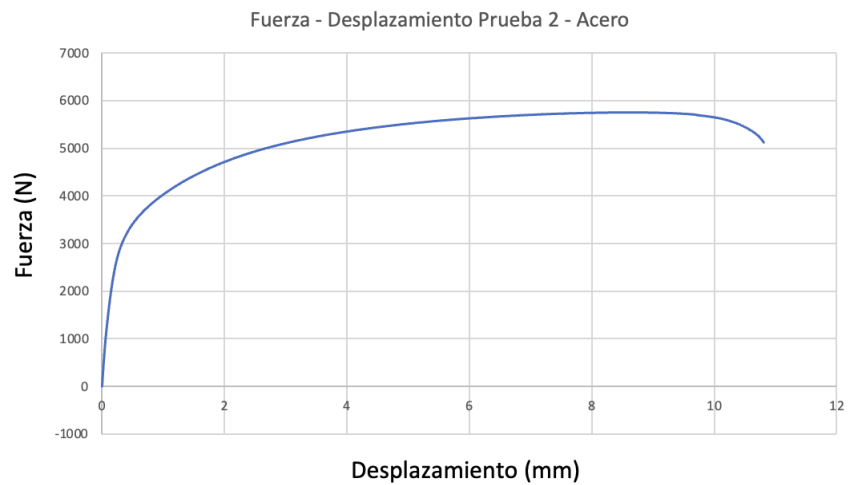
Curva esfuerzo - deformación real para la primera prueba de tracción en acero ASTM 500.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación real del primer ensayo del acero ASTM A500.

Figura 57.

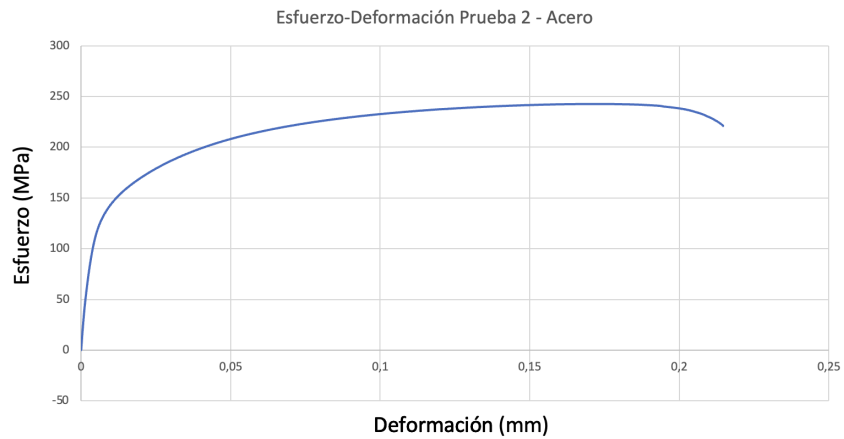
Curva fuerza - desplazamiento para la segunda prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva fuerza-desplazamiento del segundo ensayo del acero ASTM A500.

Figura 58.

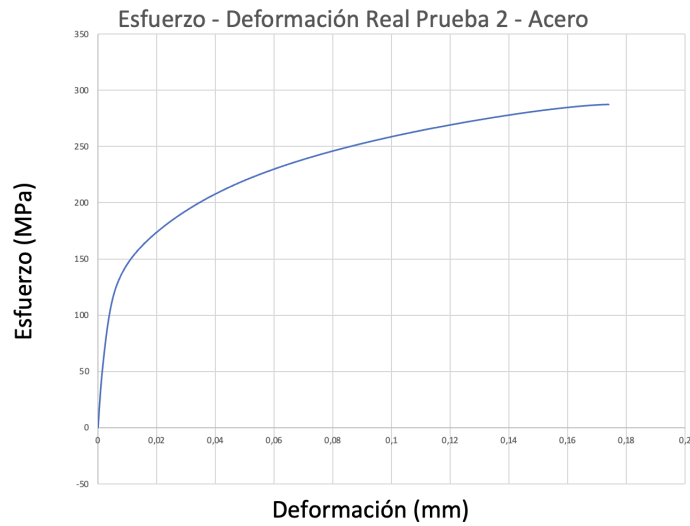
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la segunda prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación del segundo ensayo del acero ASTM A500.

Figura 59.

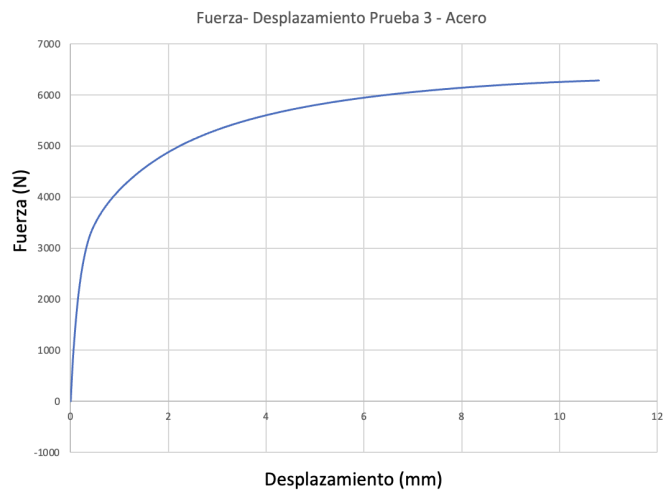
Curva esfuerzo - deformación real para la segunda prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación real del segundo ensayo del acero ASTM A500.

Figura 60.

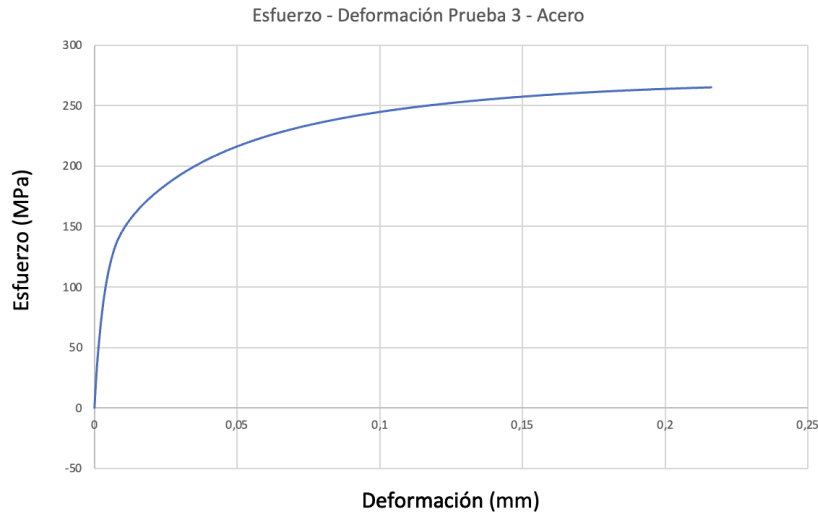
Curva fuerza - desplazamiento para la tercera prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva fuerza-desplazamiento del tercer ensayo del acero ASTM A500.

Figura 61.

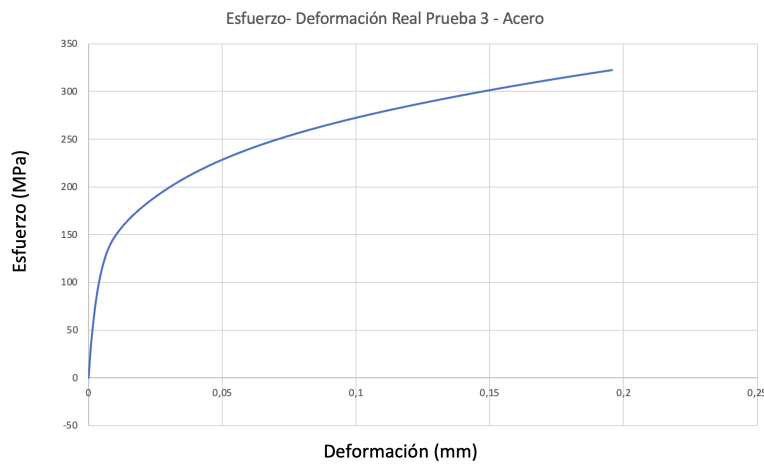
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la tercera prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación del tercer ensayo del acero ASTM A500.

Figura 62.

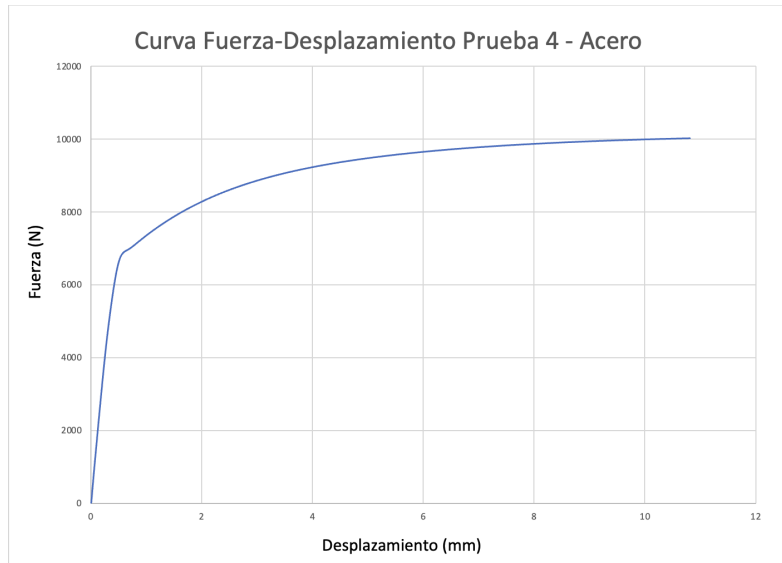
Curva esfuerzo - deformación real para la tercera prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación real del tercer ensayo del acero ASTM A500.

Figura 63.

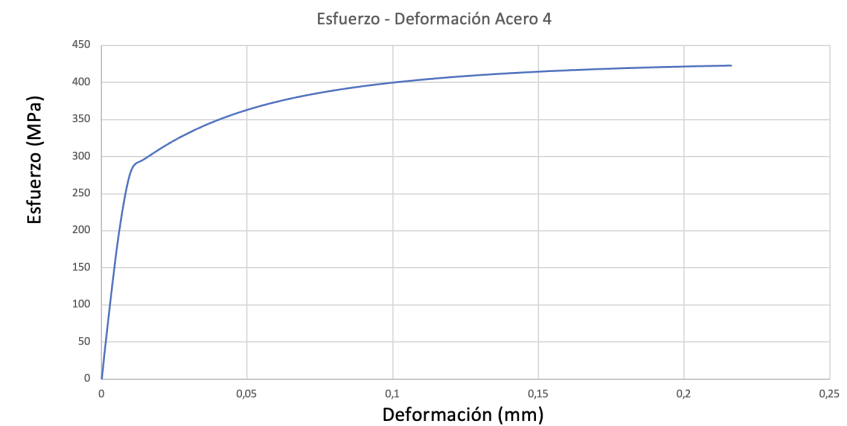
Curva fuerza - desplazamiento para la cuarta prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva fuerza-desplazamiento del cuarto ensayo del acero ASTM A500.

Figura 64.

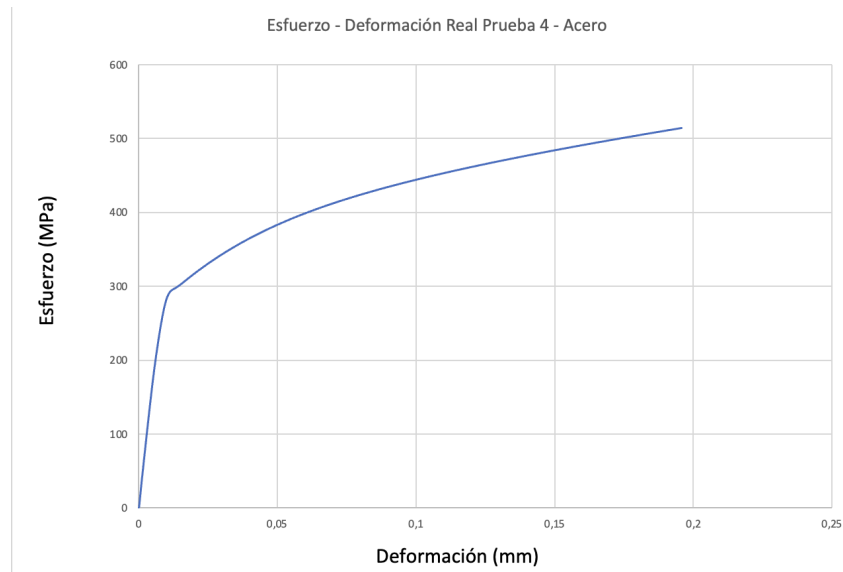
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la cuarta prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación del cuarto ensayo del acero ASTM A500.

Figura 65.

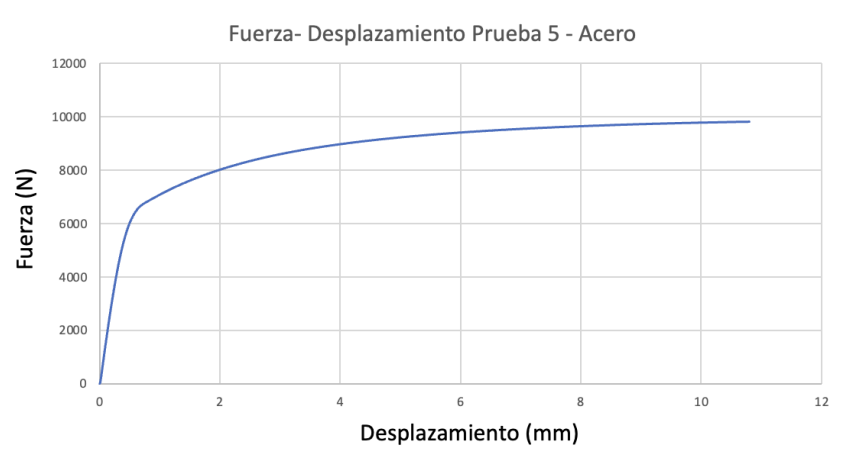
Curva esfuerzo - deformación real para la cuarta prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación real del cuarto ensayo del acero ASTM A500.

Figura 66.

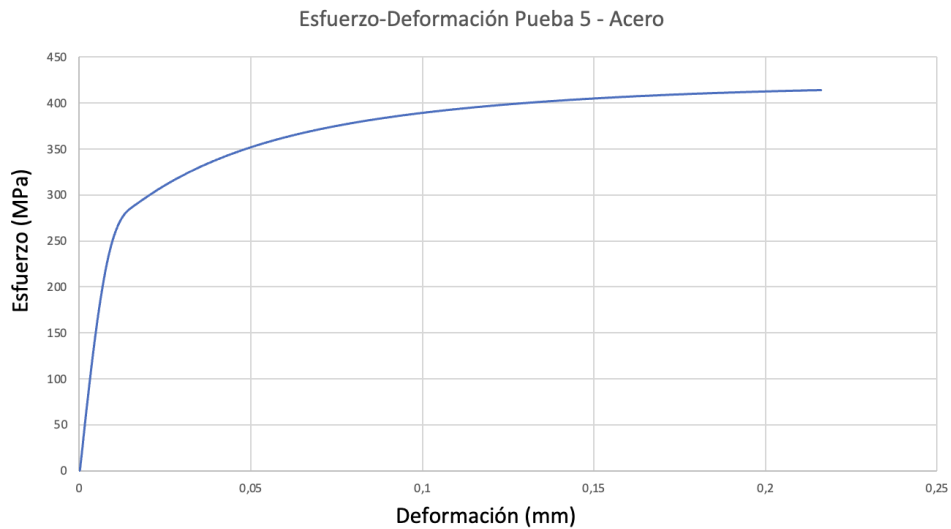
Curva fuerza - desplazamiento para la quinta prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva fuerza-desplazamiento del quinto ensayo del acero ASTM A500.

Figura 67.

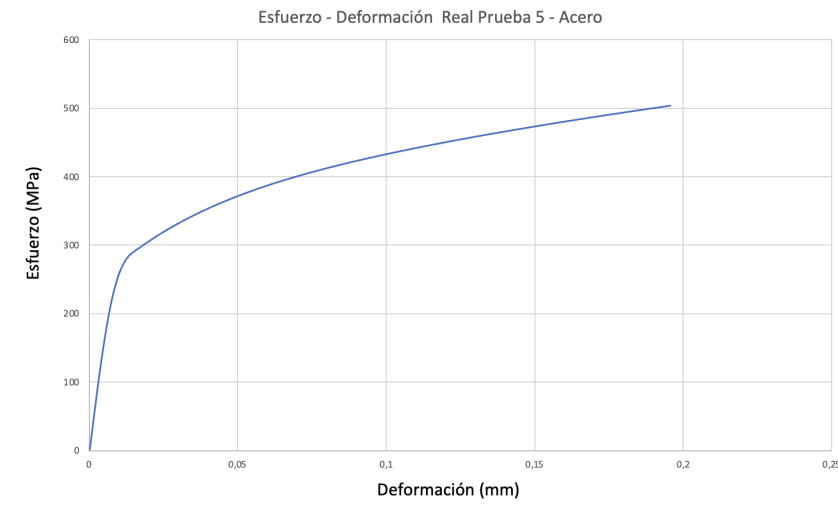
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la quinta prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación del quinto ensayo del acero ASTM A500.

Figura 68.

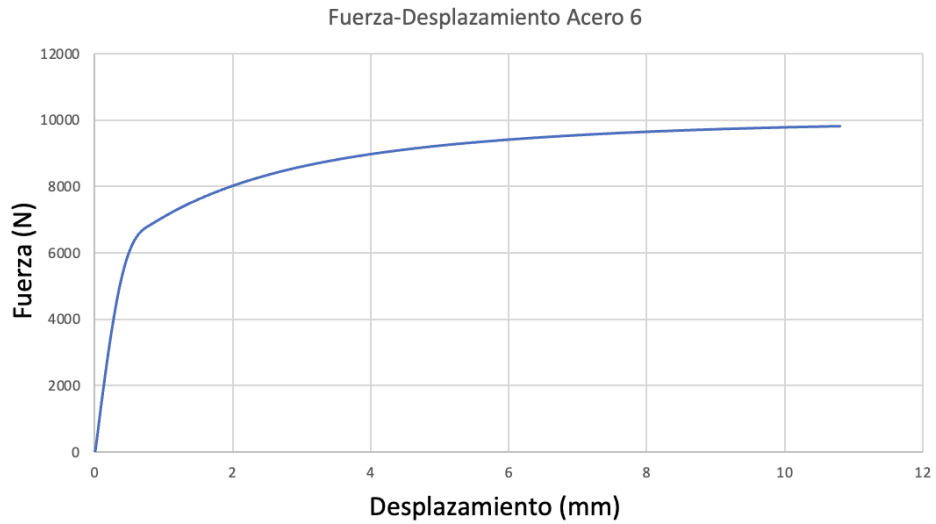
Curva esfuerzo - deformación real para la quinta prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación real del quinto ensayo del acero ASTM A500.

Figura 69.

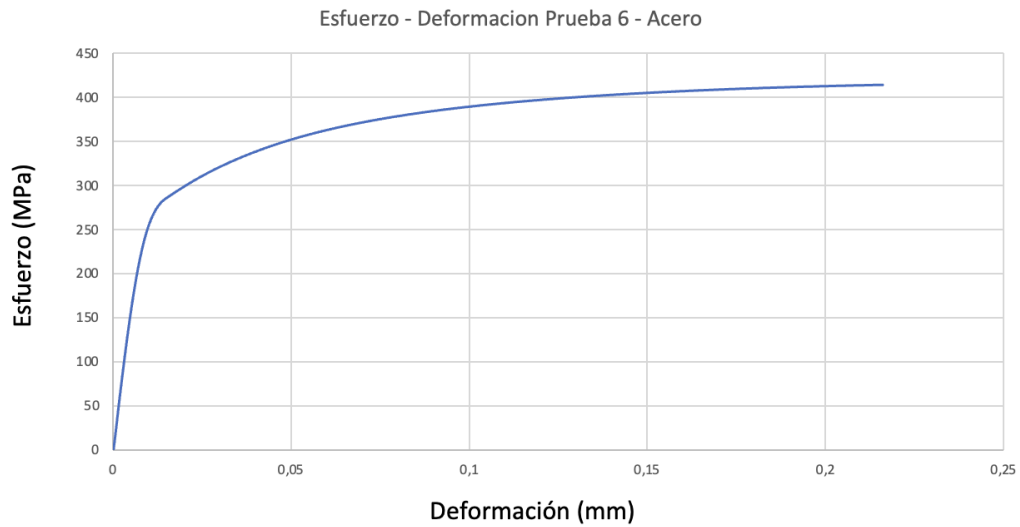
Curva fuerza - desplazamiento para la sexta prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva fuerza-desplazamiento del sexto ensayo del acero ASTM A500.

Figura 70.

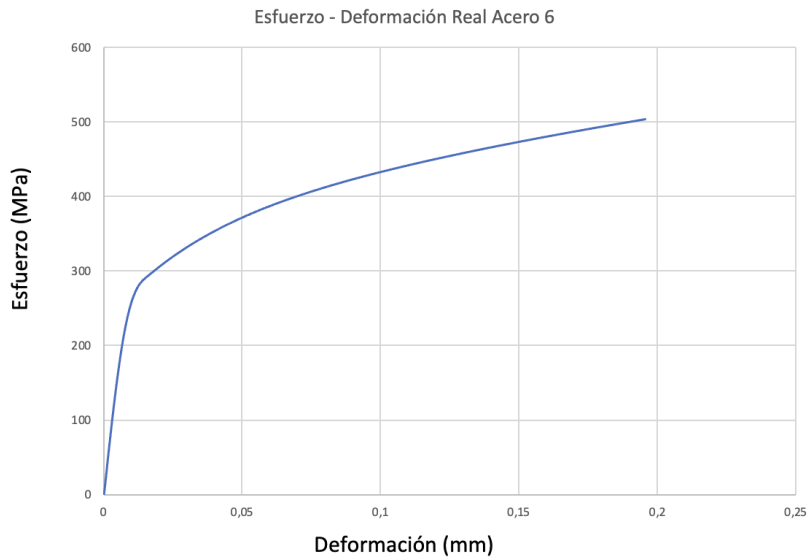
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la sexta prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación del sexto ensayo del acero ASTM A500.

Figura 71.

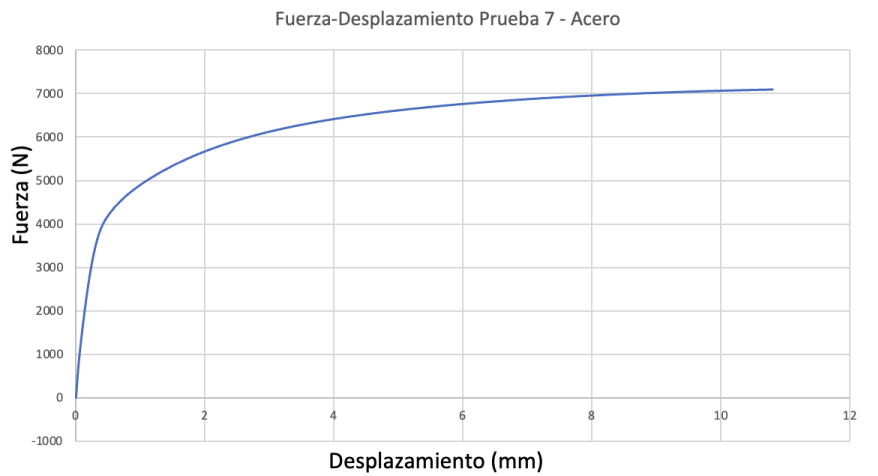
Curva esfuerzo - deformación real para la sexta prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación real del sexto ensayo del acero ASTM A500.

Figura 72.

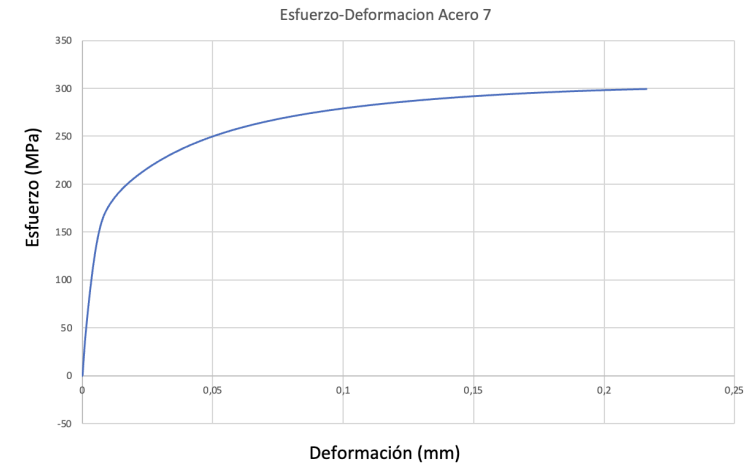
Curva fuerza - desplazamiento para la séptima prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva fuerza-desplazamiento del séptimo ensayo del acero ASTM A500.

Figura 73.

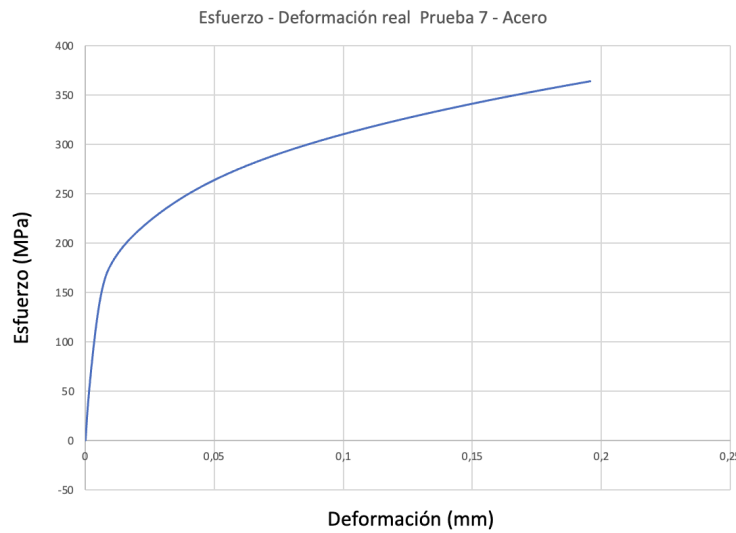
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la séptima prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación del séptimo ensayo del acero ASTM A500.

Figura 74.

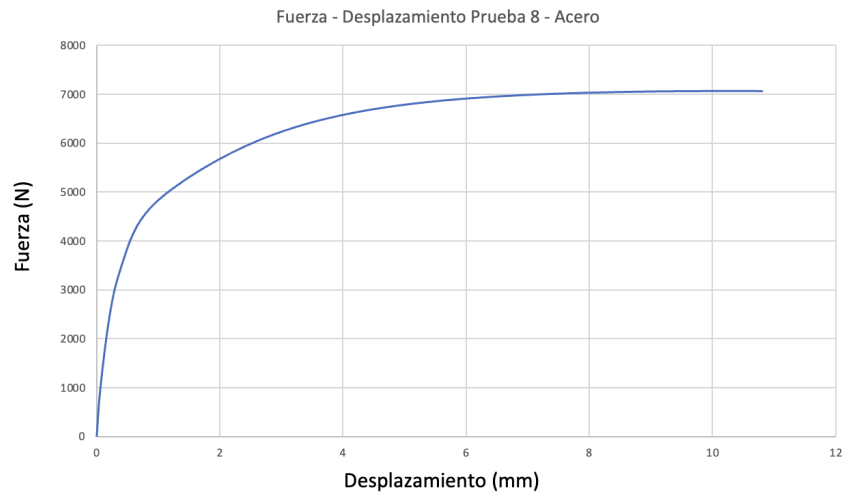
Curva esfuerzo - deformación real para la séptima prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación real del séptimo ensayo del acero ASTM A500.

Figura 75.

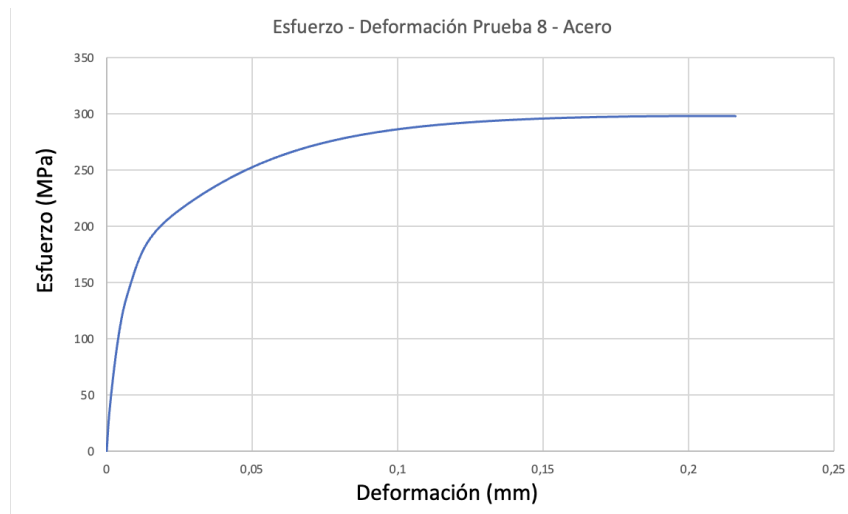
Curva fuerza - desplazamiento para la octava prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva fuerza-desplazamiento del octavo ensayo del acero ASTM A500.

Figura 76.

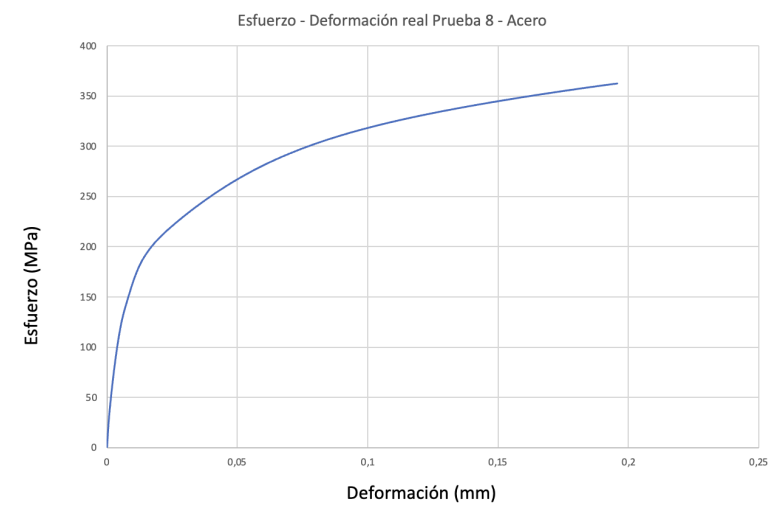
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la octava prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación del octavo ensayo del acero ASTM A500.

Figura 77.

Curva esfuerzo - deformación real para la octava prueba de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación real del octavo ensayo del acero ASTM A500.

Tabla 20.

Medición de la longitud inicial y final para cada probeta

Ensayo	Longitud Inicial (mm)	Longitud final (mm)
1	50,1	62,39
2	49,8	60,27
3	51,2	67,66
4	48,9	69,86
5	50,3	72,38
6	49,9	66,64
7	49,5	65,79
8	50,5	64,75

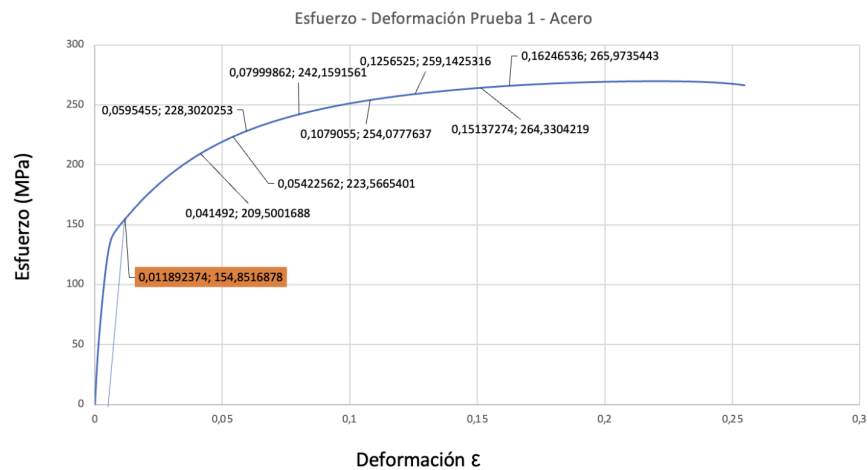
Nota. Tabla de datos medidos antes y después del ensayo de tracción.

ANEXO 2. CÁLCULOS PARA EL COEFICIENTE DE ENDURECIMIENTO POR DEFORMACIÓN PARA EL ACERO ASTM A500

En este anexo se muestran los datos obtenidos a partir de los cálculos basados en la norma ASTM E 646 para el coeficiente de endurecimiento por deformación del acero ASTM A500.

Figura 78.

Selección de pares de datos para el primer ensayo de tracción en acero ASTM A500



Nota. Imagen de la selección de pares de datos para el primer ensayo del acero ASTM A500.

Tabla 21.

Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el primer ensayo de tracción en acero ASTM A500.

Pares de datos	Carga, F (N)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real, σ , (MPa)	Sección de Ensayo de la Probeta (mm)	$Y = \log_{10}(\sigma)$	Y^2	Extensión, mm	Deformación Ingenieril, ϵ	Deformación Real, ϵ	$X = \log_{10}(\epsilon)$	X^2	XY
1	4.965	130	135	50	2,13	4,54	2,07	0,04	0,041	-1,39	1,94	-2,97
2	5.299	140	148	50	2,17	4,70	2,71	0,05	0,053	-1,28	1,63	-2,77
3	5.411	143	152	50	2,18	4,75	2,98	0,06	0,058	-1,24	1,53	-2,70
4	5.739	151	163	50	2,21	4,89	4,00	0,08	0,077	-1,11	1,24	-2,46
5	6.314	160	201	50	2,30	5,30	12,74	0,25	0,227	-0,64	0,41	-1,48
6	6.265	165	190	50	2,28	5,19	7,57	0,15	0,141	-0,85	0,72	-1,94
7	6.303	166	193	50	2,29	5,22	8,12	0,16	0,150	-0,82	0,68	-1,88
8	6.142	162	182	50	2,26	5,11	6,28	0,13	0,118	-0,93	0,86	-2,10
				Σ	17,82	39,73			Σ	-8,27	9,02	-18,30

Nota. Tabla del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el primer ensayo del acero ASTM A500.

Tabla 22.

Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el primer ensayo de tracción en acero ASTM A500.

Paso 1	-18,41	\bar{X} =	-1,03		
S_{xy} =	0,11	\bar{y} =	2,23	Paso 9	0,03
Paso 3	8,54	$n\bar{X}$ =	-0,25	S_{yy} =	34,76
S_{xx} =	0,48	b =	2,47	$S^2 y$ =	5,79
		K (MPa) =	298,11	$SDn1^2$ =	12,15
$n1$=	0,24	$\log K$ =	2,47	$SDn1$ =	3,49

Nota. Tabla final del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el primer ensayo del acero ASTM A500.

Figura 79.

Selección de pares de datos para el segundo ensayo de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la selección de pares de datos para el segundo ensayo del acero ASTM A500.

Tabla 23.

Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el segundo ensayo de tracción en acero ASTM A500.

Par de datos	Carga, F (N)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real, σ , (MPa)	Sección de Ensayo de la Probeta (mm)	$Y = \log 10 (\sigma)$	Y^2	Extensión, mm	Deformación Ingenieril, ϵ	Deformación Real, ϵ	$X = \log 10 (\epsilon)$	X^2	XY
1	4.711	198	206	50	2,31	5,36	2,00	0,04	0,04	-1,41	1,98	-3,26
2	4.933	208	218	50	2,34	5,47	2,50	0,05	0,05	-1,31	1,72	-3,07
3	4.989	210	221	50	2,34	5,50	2,65	0,05	0,05	-1,29	1,66	-3,02
4	5.191	219	233	50	2,37	5,60	3,30	0,07	0,06	-1,19	1,43	-2,83
5	5.362	226	244	50	2,39	5,70	4,06	0,08	0,08	-1,11	1,23	-2,64
6	5.566	234	260	50	2,41	5,83	5,41	0,11	0,10	-0,99	0,98	-2,39
7	5.701	240	274	50	2,44	5,94	7,00	0,14	0,13	-0,88	0,78	-2,15
8	5.668	239	270	50	2,43	5,91	6,50	0,13	0,12	-0,91	0,83	-2,22
				Σ	19,04	45,31			Σ	-9,09	10,60	-21,57

Nota. Tabla del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el segundo ensayo del acero ASTM A500.

Tabla 24.

Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el segundo ensayo de tracción en acero ASTM A500.

Paso 1	-21,63	$\bar{X} =$	-1,14		
$S_{xy} =$	0,06	$\bar{y} =$	2,38	Paso 9	0,01
Paso 3	10,33	$n\bar{X} =$	-0,26	$S_{yy} =$	39,64
$S_{xx} =$	0,27	$b =$	2,64	$S^2 y =$	6,60
		K (MPa) =	440,74	$SDn1^2 =$	24,77
$n2 =$	0,23	$\log K =$	2,64	$SDn2 =$	4,98

Nota. Tabla final del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el segundo ensayo del acero ASTM A500.

Figura 80.

Selección de pares de datos para el tercer ensayo de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la selección de pares de datos para el tercer ensayo del acero ASTM A500.

Tabla 25.

Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el tercer ensayo de tracción en acero ASTM A500.

Par de datos	Carga, F (N)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real, σ , (MPa)	Sección de Ensayo de la Probeta (mm)	$Y = \log 10 (\sigma)$	Y^2	Extensión, mm	Deformación Ingenieril, ϵ	Deformación Real, ϵ	$X = \log 10 (\epsilon)$	X^2	XY	
1	5.038	212	222	50	2,35	5,50	2,31	0,05	0,05	-1,3	1,8	-3,2	
2	5.364	226	240	50	2,38	5,67	3,14	0,06	0,06	-1,2	1,5	-2,9	
3	5.444	229	245	50	2,39	5,71	3,40	0,07	0,07	-1,2	1,4	-2,8	
4	5.679	239	260	50	2,41	5,83	4,35	0,09	0,08	-1,1	1,2	-2,6	
5	5.834	246	271	50	2,43	5,92	5,20	0,10	0,10	-1,0	1,0	-2,4	
6	5.900	248	277	50	2,44	5,96	5,65	0,11	0,11	-1,0	0,9	-2,4	
7	5.926	250	279	50	2,45	5,98	5,84	0,12	0,11	-1,0	0,9	-2,3	
8	6.068	256	292	50	2,47	6,08	7,13	0,14	0,13	-0,9	0,8	-2,2	
				Σ	19,32	46,65				Σ	-8,6	9,5	-20,8

Nota. Tabla del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el tercer ensayo del acero ASTM A500.

Tabla 26.

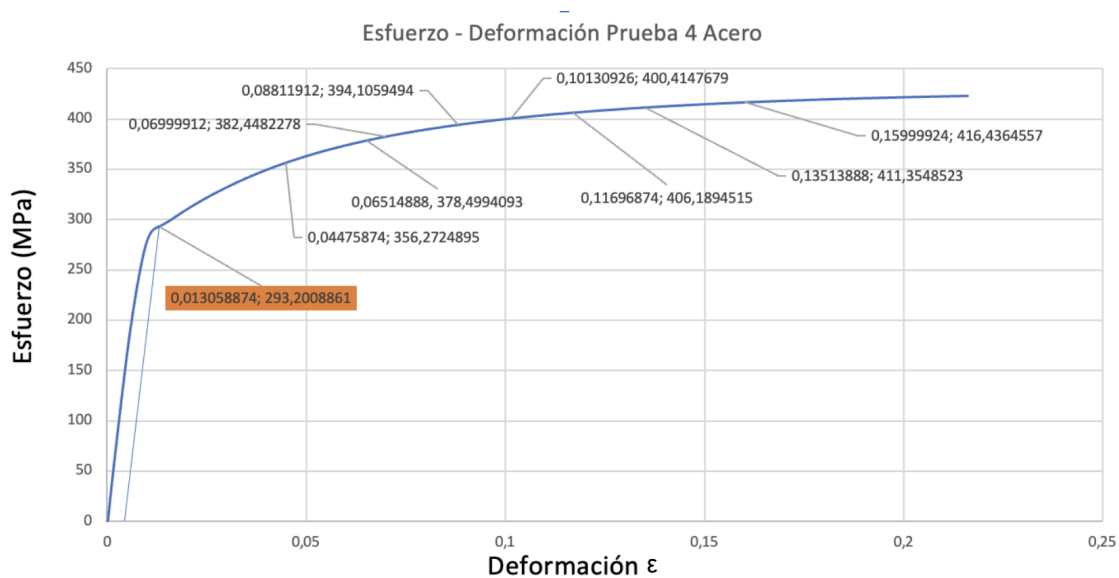
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el tercer ensayo de tracción en acero ASTM A500.

Paso 1	-20,83	\bar{X} =	-1,08		
Sxy=	0,04	\bar{y} =	2,41	Paso 9	0,01
Paso 3	9,31	$n\bar{X}$ =	-0,27	Syy=	40,82
Sxx=	0,17	b=	2,69	S ² y=	6,80
		K (MPa) =	486,20	SDn1 ² =	39,06
n3=	0,25	log K=	2,69	SDn3=	6,25

Nota. Tabla final del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el tercer ensayo del acero ASTM A500.

Figura 81.

Selección de pares de datos para el cuarto ensayo de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la selección de pares de datos para el cuarto ensayo del acero ASTM A500.

Tabla 27.

Cálculos para la determinación del coeficiente n , la constante K y la desviación estándar de n para el cuarto ensayo de tracción en acero ASTM A500.

Par de datos	Carga, F (N)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real, σ , (MPa)	Sección de Ensayo de la Probeta (mm)	$Y = \log 10 (\sigma)$	Y^2	Extensión mm	Deformación Ingenieril, ϵ	Deformación Real, ϵ	$X = \log 10 (\epsilon)$	X^2	XY
1	8.443	356	370	50	2,57	6,59	2,00	0,04	0,04	-1,41	1,98	-3,61
2	8.970	378	397	50	2,60	6,75	2,50	0,05	0,05	-1,31	1,72	-3,41
3	9.064	382	402	50	2,60	6,78	2,65	0,05	0,05	-1,29	1,66	-3,35
4	9.340	393	419	50	2,62	6,88	3,30	0,07	0,06	-1,19	1,43	-3,13
5	9.489	400	432	50	2,64	6,95	4,06	0,08	0,08	-1,11	1,23	-2,92
6	9.627	405	449	50	2,65	7,04	5,41	0,11	0,10	-0,99	0,98	-2,62
7	9.627	405	462	50	2,66	7,10	7,00	0,14	0,13	-0,88	0,78	-2,35
8	9.869	416	470	50	2,67	7,14	6,50	0,13	0,12	-0,91	0,83	-2,44
				Σ	21,02	55,22			Σ	-9,09	10,60	-23,83

Nota. Tabla del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el cuarto ensayo del acero ASTM A500.

Tabla 28.

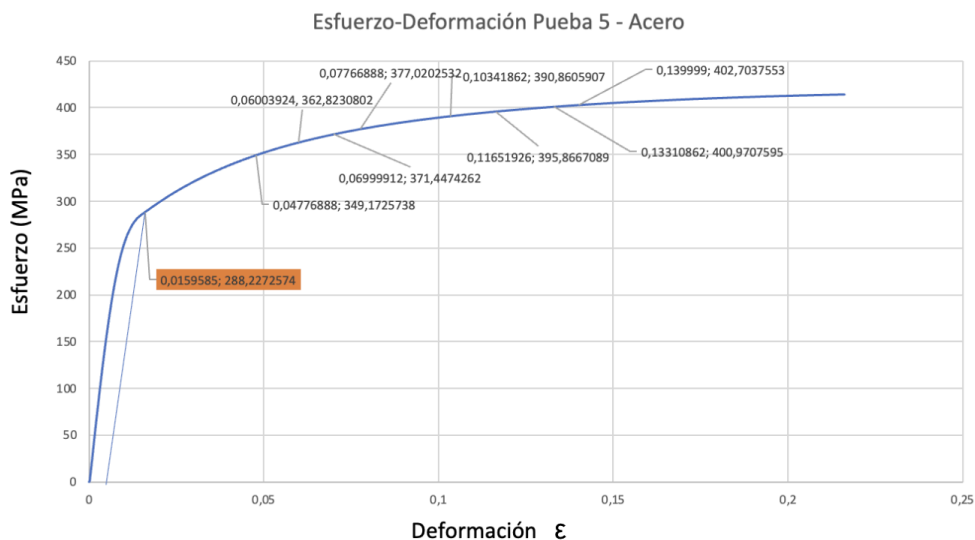
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el cuarto ensayo de tracción en acero ASTM A500.

Paso 1	-23,88	$\bar{X} =$	-1,14		
$S_{xy} =$	0,05	$\bar{y} =$	2,63	Paso 9	0,01
Paso 3	10,33	$n\bar{X} =$	-0,21	$S_{yy} =$	48,32
$S_{xx} =$	0,27	$b =$	2,83	$S^2 y =$	8,05
		K (MPa) =	680,41	$SDn^2 =$	30,20
$n4 =$	0,18	$\log K =$	2,83	$SDn4 =$	5,50

Nota. Tabla final del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el cuarto ensayo del acero ASTM A500.

Figura 82.

Selección de pares de datos para el quinto ensayo de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la selección de pares de datos para el quinto ensayo del acero ASTM A500.

Tabla 29.

Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el quinto ensayo de tracción en acero ASTM A500.

Par de datos	Carga, F (N)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real, σ, (MPa)	Sección de Ensayo de la Probeta (mm)	Y= log 10 (σ)	Y'2	Extensión, mm	Deformación Ingenieril, ε	Deformación Real, ε	X=log 10 (ε)	X'2	XY
1	8.270	348	365	50	2,56	6,56	2,39	0,05	0,05	-1,33	1,77	-3,41
2	8.600	362	384	50	2,58	6,68	3,00	0,06	0,06	-1,23	1,52	-3,19
3	8.800	371	396	50	2,60	6,75	3,50	0,07	0,07	-1,17	1,37	-3,04
4	8.930	376	405	50	2,61	6,80	3,88	0,08	0,07	-1,13	1,27	-2,94
5	9.260	390	430	50	2,63	6,94	5,17	0,10	0,10	-1,01	1,01	-2,65
6	9.380	395	441	50	2,64	6,99	5,82	0,12	0,11	-0,96	0,92	-2,53
7	9.500	400	453	50	2,66	7,06	6,65	0,13	0,12	-0,90	0,82	-2,40
8	9.540	402	458	50	2,66	7,08	7,00	0,14	0,13	-0,88	0,78	-2,35
				Σ	20,95	54,86			Σ	-8,61	9,46	-22,51

Nota. Tabla del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el quinto ensayo del acero ASTM A500.

Tabla 30.

Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el quinto ensayo de tracción en acero ASTM A500.

Paso 1	-22,55	\bar{X} =	-1,08		
Sxy=	0,04	\bar{y} =	2,62	Paso 9	0,01
Paso 3	9,27	$n\bar{X}$ =	-0,24	Syy=	48,00
Sxx=	0,19	b=	2,85	S ² y=	8,00
		K (MPa) =	715,42	SDn1 ² =	42,74
n5=	0,22	log K=	2,85	SDn5=	6,54

Nota. Tabla final del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el quinto ensayo del acero ASTM A500.

Figura 83.

Selección de pares de datos para el sexto ensayo de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la selección de pares de datos para el sexto ensayo del acero ASTM A500.

Tabla 31.

Cálculos para la determinación del coeficiente n , la constante K y la desviación estándar de n para el sexto ensayo de tracción en acero ASTM A500.

Par de datos	Carga, F (N)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real, σ , (MPa)	Sección de Ensayo de la Probeta (mm)	$Y = \log 10 (\sigma)$	Y^2	Extensión, mm	Deformación Ingenieril, ϵ	Deformación Real, ϵ	$X = \log 10 (\epsilon)$	X^2	XY
1	7.890	332	344	50	2,54	6,44	1,83	0,04	0,04	-1,44	2,09	-3,66
2	8.470	357	376	50	2,58	6,63	2,73	0,05	0,05	-1,27	1,62	-3,28
3	8.660	365	388	50	2,59	6,70	3,15	0,06	0,06	-1,21	1,47	-3,14
4	8.870	373	401	50	2,60	6,78	3,70	0,07	0,07	-1,15	1,31	-2,98
5	9.260	390	430	50	2,63	6,94	5,17	0,10	0,10	-1,01	1,01	-2,65
6	9.370	395	440	50	2,64	6,99	5,74	0,11	0,11	-0,96	0,93	-2,55
7	9.550	402	459	50	2,66	7,08	7,03	0,14	0,13	-0,88	0,78	-2,34
8	9.620	405	467	50	2,67	7,13	7,67	0,15	0,14	-0,85	0,71	-2,26
				Σ	20,91	54,68			Σ	-8,78	9,93	-22,87

Nota. Tabla del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el sexto ensayo del acero ASTM A500.

Tabla 32.

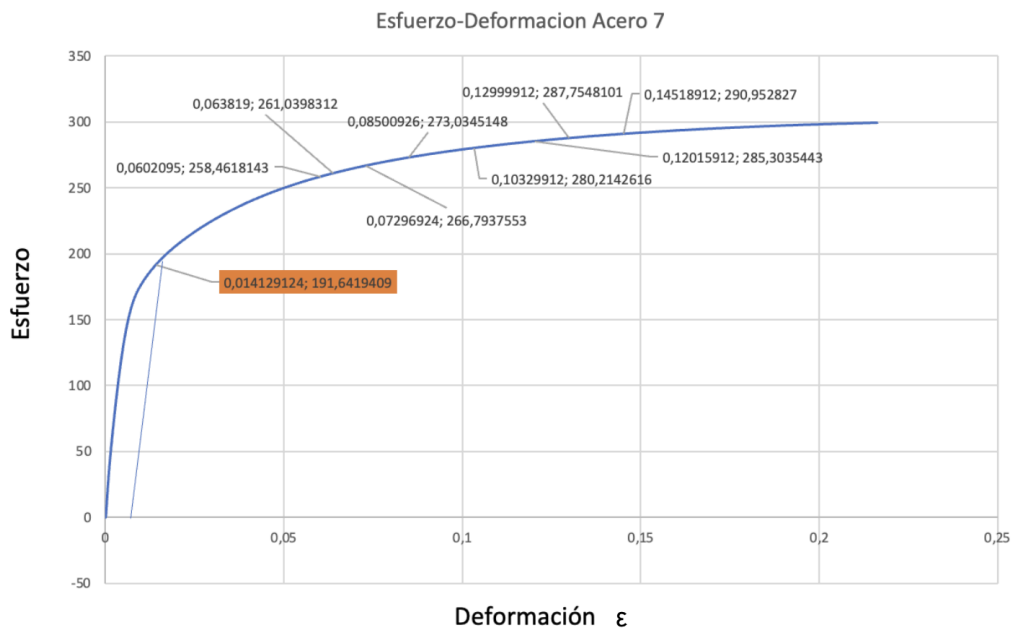
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el sexto ensayo de tracción en acero ASTM A500.

Paso 1	-22,94	$\bar{X} =$	-1,10		
$S_{xy} =$	0,07	$\bar{y} =$	2,61	Paso 9	0,01
Paso 3	9,63	$n\bar{X} =$	-0,24	$S_{yy} =$	47,84
$S_{xx} =$	0,30	$b =$	2,86	$S^2 y =$	7,97
		K (MPa) =	717,47	$SDn1^2 =$	26,22
$n6 =$	0,22	$\log K =$	2,86	$SDn6 =$	5,12

Nota. Tabla final del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el sexto ensayo del acero ASTM A500.

Figura 84.

Selección de pares de datos para el séptimo ensayo de tracción en acero ASTM A500



Nota. Imagen de la selección de pares de datos para el séptimo ensayo del acero ASTM A500.

Tabla 33.

Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el séptimo ensayo de tracción en acero ASTM A500.

Par de datos	Carga, F (N)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real, σ , (MPa)	Sección de Ensayo de la Probeta (mm)	$Y = \log 10 (\sigma)$	Y^2	Extensión, mm	Deformación Ingenieril, ϵ	Deformación Real, ϵ	$X = \log 10 (\epsilon)$	X^2	XY
1	6.130	258	274	50	2,44	5,94	3,01	0,06	0,06	-1,23	1,52	-3,01
2	6.190	261	277	50	2,44	5,97	3,19	0,06	0,06	-1,21	1,46	-2,95
3	6.320	266	286	50	2,46	6,03	3,65	0,07	0,07	-1,15	1,33	-2,83
4	6.470	272	296	50	2,47	6,10	4,25	0,09	0,08	-1,09	1,18	-2,69
5	6.640	280	308	50	2,49	6,20	5,16	0,10	0,10	-1,01	1,02	-2,51
6	6.760	285	319	50	2,50	6,27	6,01	0,12	0,11	-0,94	0,89	-2,37
7	6.820	287	324	50	2,51	6,31	6,50	0,13	0,12	-0,91	0,83	-2,29
8	6.900	291	333	50	2,52	6,36	7,26	0,15	0,14	-0,87	0,75	-2,19
				Σ	19,83	49,17			Σ	-8,42	8,99	-20,83

Nota. Tabla del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el séptimo ensayo del acero ASTM A500.

Tabla 34.

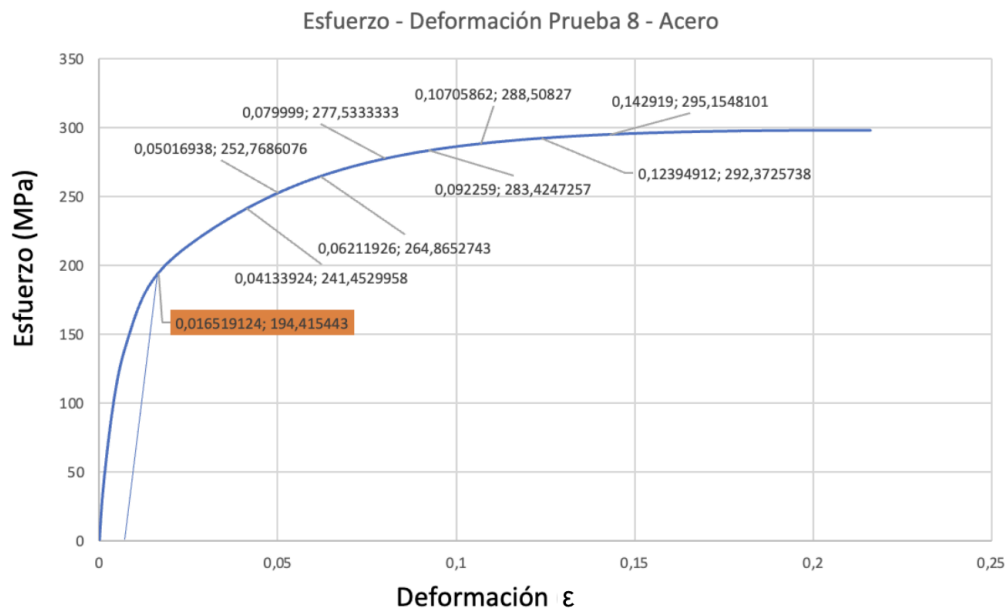
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el séptimo ensayo de tracción en acero ASTM A500.

Paso 1	-20,86	$\bar{X} =$	-1,05		
$S_{xy} =$	0,03	$\bar{y} =$	2,48	Paso 9	0,01
Paso 3	8,85	$n\bar{X} =$	-0,24	$S_{yy} =$	43,03
$S_{xx} =$	0,14	$b =$	2,72	$S^2 y =$	7,17
		K (MPa) =	528,13	$SDn1^2 =$	52,95
$n7 =$	0,23	$\log K =$	2,72	$SDn7 =$	7,28

Nota. Tabla final del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el séptimo ensayo del acero ASTM A500.

Figura 85.

Selección de pares de datos para el octavo ensayo de tracción en acero ASTM A500.



Nota. Imagen de la selección de pares de datos para el octavo ensayo del acero ASTM A500.

Tabla 35.

Cálculos para la determinación del coeficiente n , la constante K y la desviación estándar de n para el octavo ensayo de tracción en acero ASTM A500.

Par de datos	Carga, F (N)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real, σ , (MPa)	Sección de Ensayo de la Probeta (mm)	$Y = \log 10 (\sigma)$	Y^2	Extensión, mm	Deformación Ingenieril, ϵ	Deformación Real, ϵ	$X = \log 10 (\epsilon)$	X^2	XY	
1	5.720	241	251	50	2,40	5,76	2,07	0,04	0,04	-1,39	1,94	-3,34	
2	5.990	252	265	50	2,42	5,87	2,51	0,05	0,05	-1,31	1,72	-3,17	
3	6.280	264	281	50	2,45	6,00	3,11	0,06	0,06	-1,22	1,49	-2,99	
4	6.580	277	299	50	2,48	6,13	4,00	0,08	0,08	-1,11	1,24	-2,76	
5	6.720	283	309	50	2,49	6,20	4,61	0,09	0,09	-1,05	1,11	-2,63	
6	6.840	288	319	50	2,50	6,27	5,36	0,11	0,10	-0,99	0,98	-2,48	
7	6.930	292	328	50	2,52	6,33	6,19	0,12	0,12	-0,93	0,87	-2,35	
8	6.990	294	336	50	2,53	6,39	7,15	0,14	0,13	-0,87	0,76	-2,21	
				Σ	19,78	48,94				Σ	-8,89	10,11	-21,92

Nota. Tabla del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el octavo ensayo del acero ASTM A500.

Tabla 36.

Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el octavo ensayo de tracción en acero ASTM A500.

Paso 1	-21,98	$\bar{X} =$	-1,11		
$S_{xy} =$	0,06	$\bar{y} =$	2,47	Paso 9	0,01
Paso 3	9,88	$n\bar{X} =$	-0,27	$S_{yy} =$	42,82
$S_{xx} =$	0,24	$b =$	2,75	$S^2 y =$	7,13
		K (MPa) =	559,50	$SDn^2 =$	30,30
$n_8 =$	0,25	$\log K =$	2,75	$SDn_8 =$	5,50

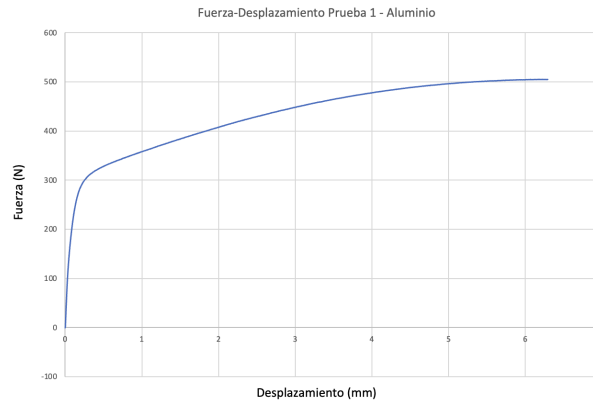
Nota. Tabla final del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el octavo ensayo del acero ASTM A500.

Anexo 3. Resultados Ensayos Aleación De Aluminio Comercial

En este anexo se muestran las curvas obtenidas a partir de los datos proporcionados por la máquina de ensayos para la aleación de aluminio.

Figura 86.

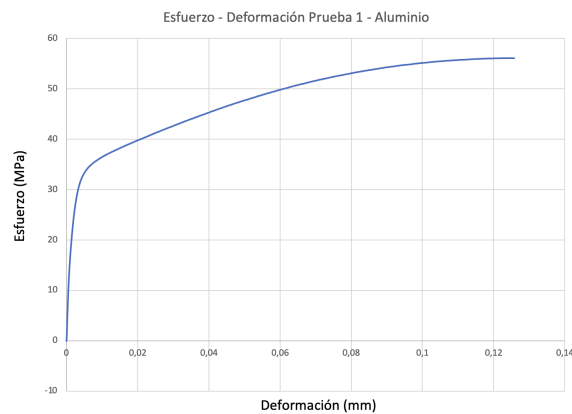
Curva fuerza - desplazamiento para la primera prueba de tracción en la aleación de aluminio.



Nota. Imagen de la curva fuerza-desplazamiento del primer ensayo de la aleación de aluminio.

Figura 87.

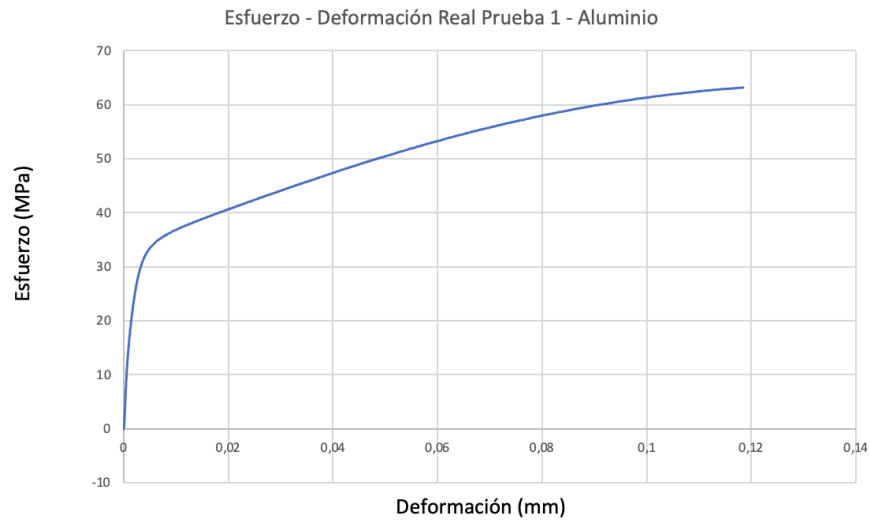
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la primera prueba de tracción en una aleación de aluminio.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación del primer ensayo en la aleación de aluminio.

Figura 88.

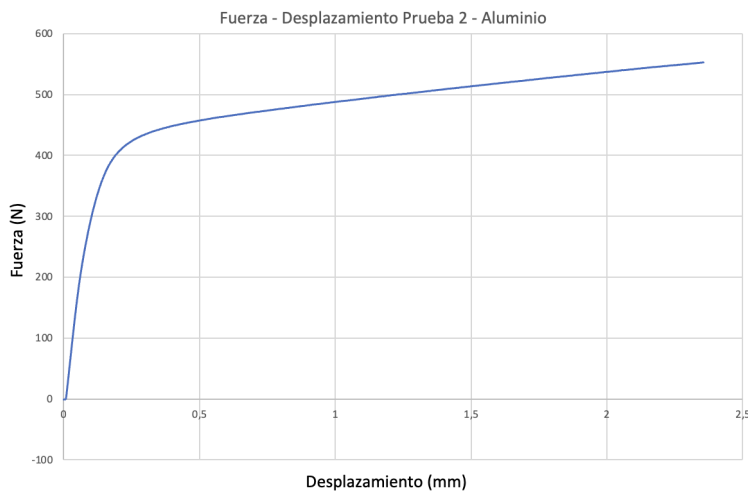
Curva esfuerzo - deformación real para la primera prueba de tracción en la aleación de aluminio.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación real del primer ensayo en la aleación de aluminio.

Figura 89.

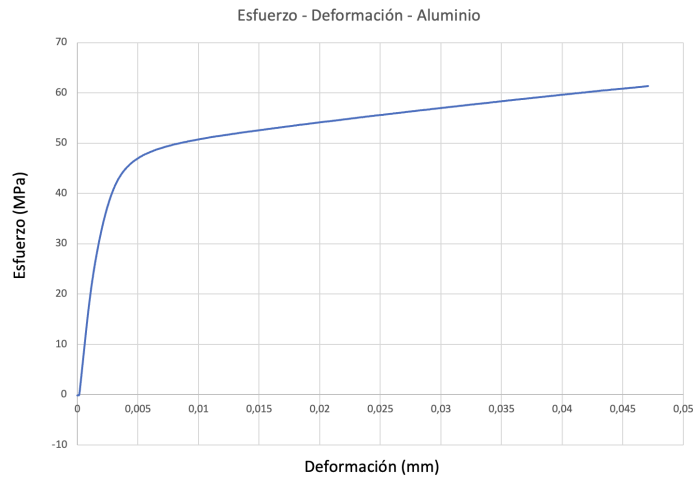
Curva fuerza - desplazamiento para la segunda prueba de tracción en una aleación de aluminio.



Nota. Imagen de la curva fuerza-desplazamiento del segundo ensayo de la aleación de aluminio.

Figura 90.

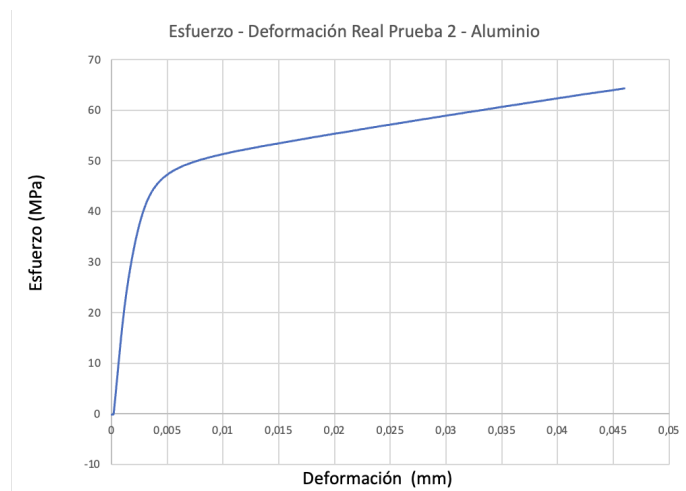
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la segunda prueba de tracción en una aleación de aluminio.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación del segundo ensayo en la aleación de aluminio.

Figura 91.

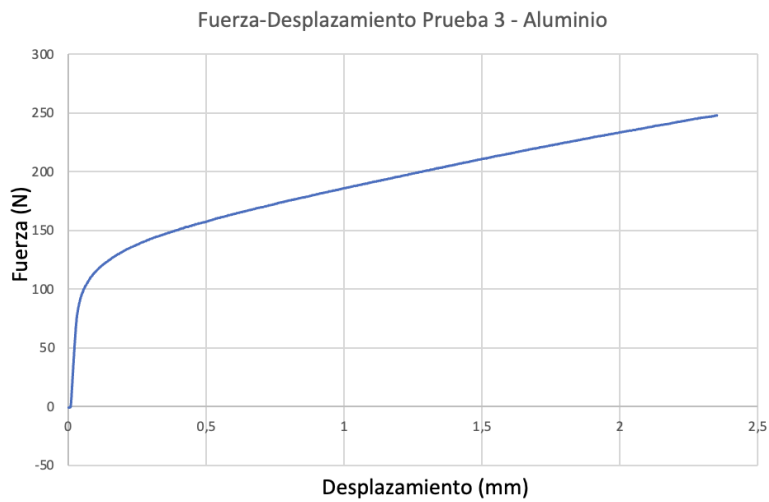
Curva esfuerzo - deformación real para la segunda prueba de tracción en una aleación de aluminio.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación real del segundo ensayo en la aleación de aluminio.

Figura 92.

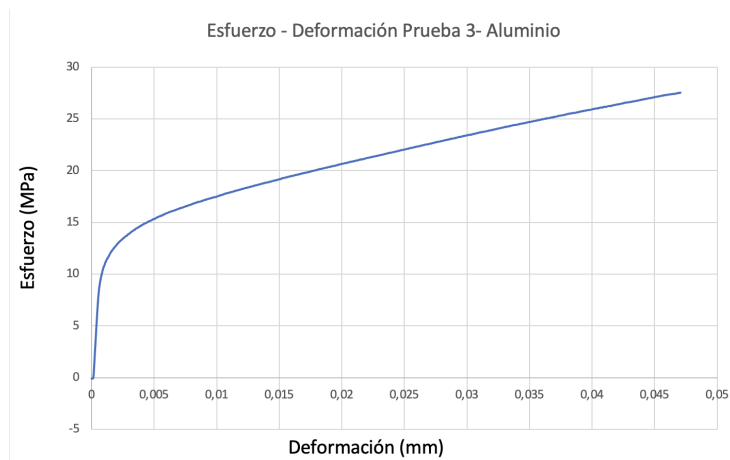
Curva fuerza - desplazamiento para la tercera prueba de tracción en una aleación de aluminio.



Nota. Imagen de la curva fuerza-desplazamiento del tercer ensayo de la aleación de aluminio.

Figura 93.

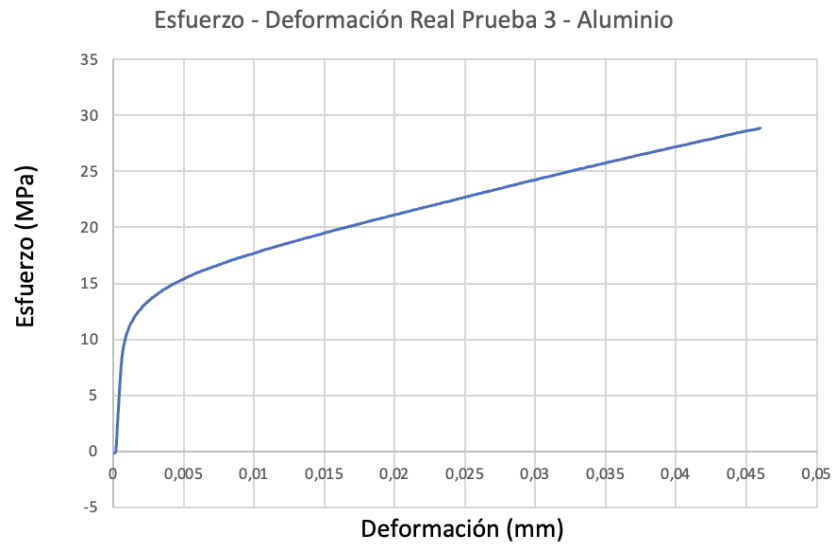
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la tercera prueba de tracción en una aleación de aluminio.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación del tercer ensayo en la aleación de aluminio.

Figura 94.

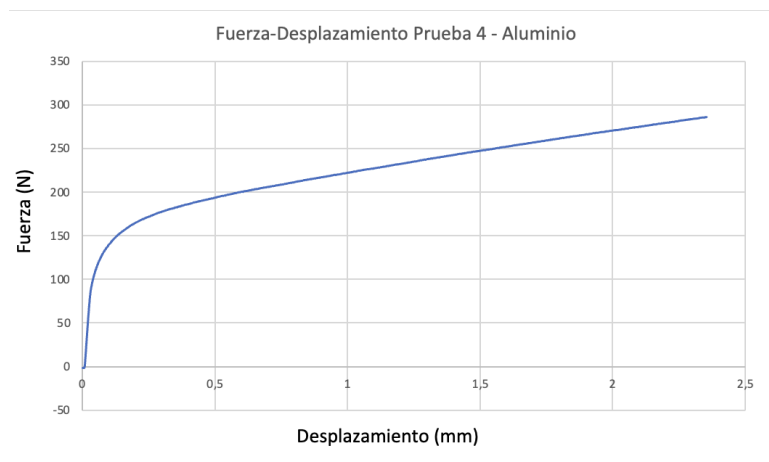
Curva esfuerzo - deformación real para la tercera prueba de tracción en una aleación de aluminio.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación real del tercer ensayo en la aleación de aluminio.

Figura 95.

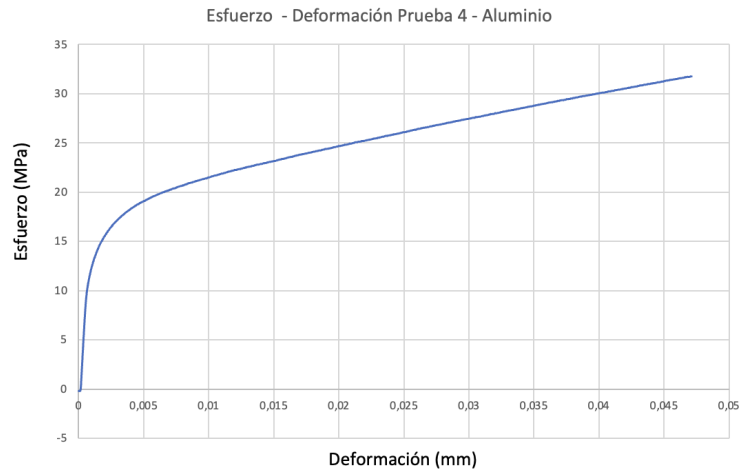
Curva fuerza - desplazamiento para la cuarta prueba de tracción en una aleación de aluminio.



Nota. Imagen de la curva fuerza-desplazamiento del cuarto ensayo de la aleación de aluminio.

Figura 96.

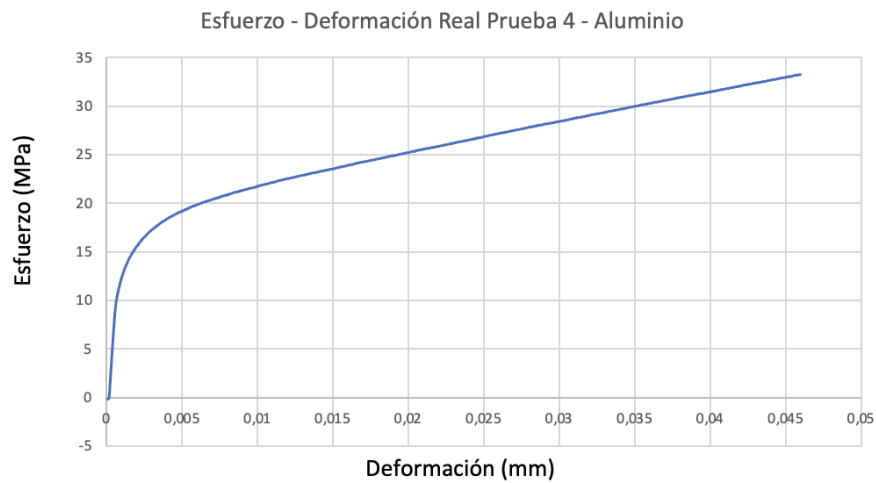
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la cuarta prueba de tracción en una aleación de aluminio.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación del cuarto ensayo en la aleación de aluminio.

Figura 97.

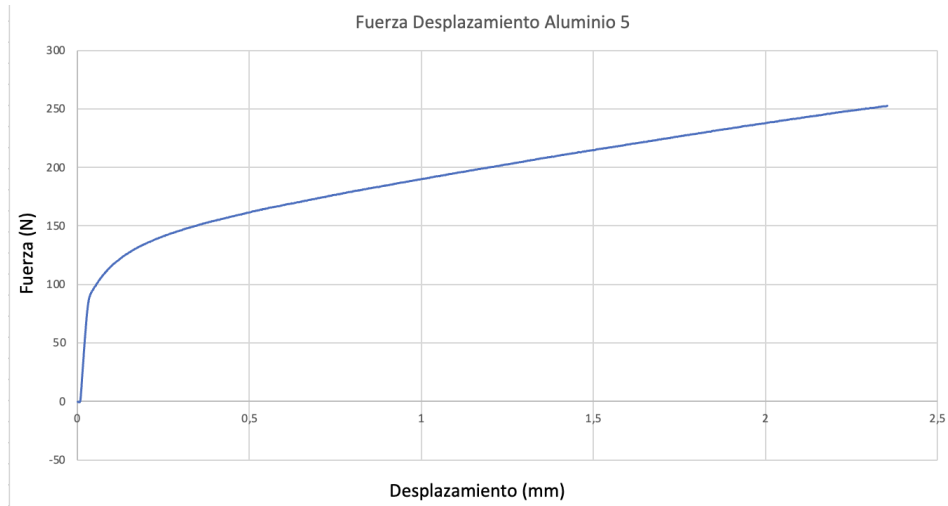
Curva esfuerzo - deformación real para la cuarta prueba de tracción en una aleación de aluminio.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación real del cuarto ensayo en la aleación de aluminio.

Figura 98.

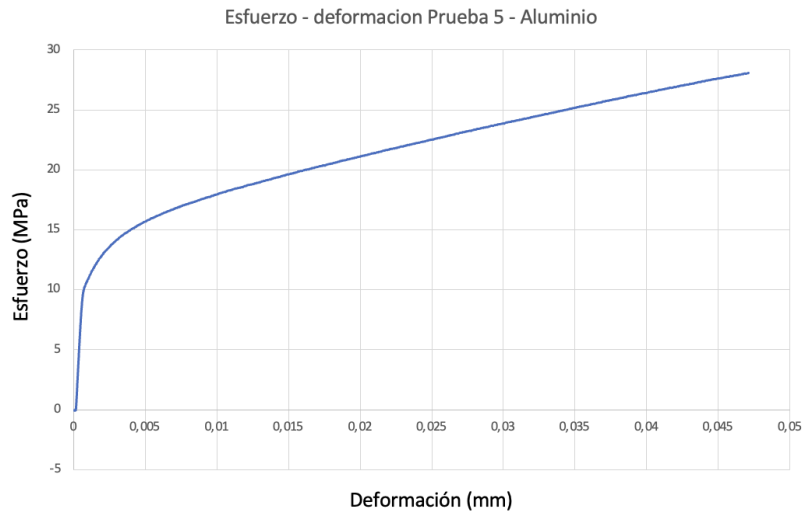
Curva fuerza - desplazamiento para la quinta prueba de tracción en una aleación de aluminio.



Nota. Imagen de la curva fuerza-desplazamiento del quinto ensayo de la aleación de aluminio.

Figura 99.

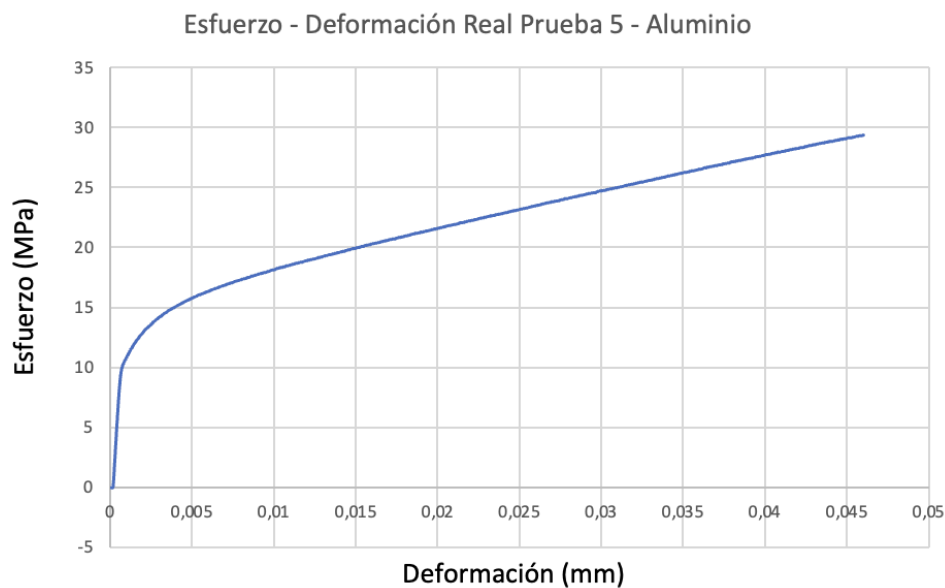
Curva esfuerzo - deformación ingenieril para la quinta prueba de tracción en una aleación de aluminio.



Nota. Imagen de la curva fuerza-desplazamiento del quinto ensayo de la aleación de aluminio.

Figura 100.

Curva esfuerzo - deformación real para la quinta prueba de tracción en una aleación de aluminio.



Nota. Imagen de la curva Esfuerzo-Deformación real del quinto ensayo en la aleación de aluminio.

Tabla 37.

Medición de la longitud final para cada probeta.

Ensayo	Longitud Inicial (mm)	Longitud final (mm)
1	49,8	56,72
2	50,3	58,12
3	50,4	57,26
4	49,9	56,53
5	49,5	57,7

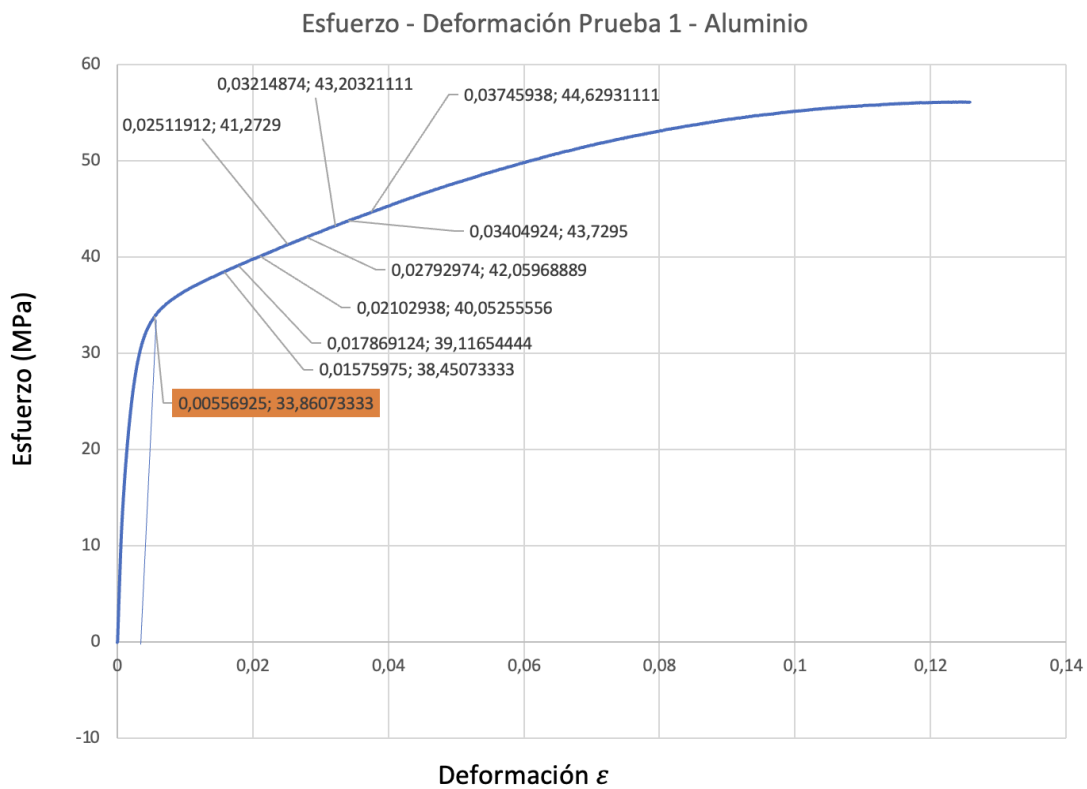
Nota. Tabla de datos medidos antes y después del ensayo de tracción.

Anexo 4. Cálculos para el coeficiente de endurecimiento por deformación para la aleación de aluminio comercial

En este anexo se muestran los datos obtenidos a partir de los cálculos basados en la norma ASTM E 646 para el coeficiente de endurecimiento por deformación de la aleación de aluminio comercial

Figura 101.

Selección de pares de datos para el primer ensayo de tracción en la aleación de aluminio comercial.



Nota. Imagen de la selección de pares de datos para el primer ensayo de aleación de aluminio.

Tabla 38.

Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el primer ensayo de tracción en la aleación de aluminio comercial.

Par de datos	Carga, F (N)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real, σ , (MPa)	Sección de Ensayo de la Probeta (mm)	$Y = \log 10 (\sigma)$	Y^2	Extensión, mm	Deformación Ingenieril, ϵ	Deformación Real, ϵ	$X = \log 10 (\epsilon)$	X^2	XY
1	346	38	39	50	1,58	2,51	0,79	0,02	0,02	-1,80	3,25	-2,86
2	352	39	40	50	1,59	2,54	0,89	0,02	0,02	-1,75	3,06	-2,78
3	360	40	41	50	1,60	2,57	1,05	0,02	0,02	-1,68	2,81	-2,69
4	371	41	42	50	1,62	2,61	1,26	0,03	0,02	-1,60	2,56	-2,59
5	378	42	43	50	1,62	2,64	1,40	0,03	0,03	-1,55	2,42	-2,52
6	389	43	45	50	1,64	2,67	1,60	0,03	0,03	-1,49	2,23	-2,44
7	394	44	45	50	1,64	2,69	1,70	0,03	0,03	-1,47	2,16	-2,41
8	402	45	46	50	1,65	2,72	1,87	0,04	0,04	-1,43	2,04	-2,35
				Σ	12,94	20,95			Σ	-12,77	20,52	-20,65

Nota. Tabla del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el primer ensayo de la aleación de aluminio.

Tabla 39.

Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el primer ensayo de tracción en la aleación de aluminio.

Paso 1	-20,67	$\bar{X} =$	-1,60		
$S_{xy} =$	0,02	$\bar{y} =$	1,62	Paso 8	0,00
Paso 3	20,39	$n\bar{X} =$	-0,27	$S_{yy} =$	18,33
$S_{xx} =$	0,13	$b =$	1,89	$S^2 y =$	3,05
		K (MPa) =	78,09	paso 11	23,56
$n_1 =$	0,17	$\log K =$	1,89	$SDn_1 =$	4,85

Nota. Tabla del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el primer ensayo de la aleación de aluminio.

Figura 102.

Selección de pares de datos para el segundo ensayo de tracción en la aleación de aluminio comercial.



Nota. Imagen de la selección de pares de datos para el segundo ensayo de aleación de aluminio.

Tabla 40.

Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el segundo ensayo de tracción en la aleación de aluminio comercial.

Par de datos	Carga, F (N)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real, σ, (MPa)	Sección de Ensayo de la Probeta (mm)	Y= log 10 (σ)	Y ²	Extensión, mm	Deformación Ingenieril, ε	Deformación Real, ε	X=log 10 (ε)	X ²	XY
1	464	52	52	50	1,71	2,93	0,59	0,01	0,01	-1,93	3,71	-3,30
2	472	52	53	50	1,72	2,96	0,72	0,01	0,01	-1,84	3,39	-3,17
3	480	53	54	50	1,73	2,98	0,87	0,02	0,02	-1,76	3,10	-3,04
4	494	55	56	50	1,74	3,03	1,11	0,02	0,02	-1,65	2,73	-2,88
5	505	56	58	50	1,75	3,06	1,33	0,03	0,03	-1,58	2,48	-2,75
6	516	57	59	50	1,76	3,09	1,56	0,03	0,03	-1,51	2,27	-2,65
7	525	58	60	50	1,77	3,12	1,74	0,03	0,03	-1,46	2,13	-2,58
8	533	59	61	50	1,77	3,14	1,92	0,04	0,04	-1,42	2,00	-2,51
				Σ	13,94	24,31			Σ	-13,14	21,82	-22,87

Nota. Tabla del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el segundo ensayo de la aleación de aluminio.

Tabla 41.

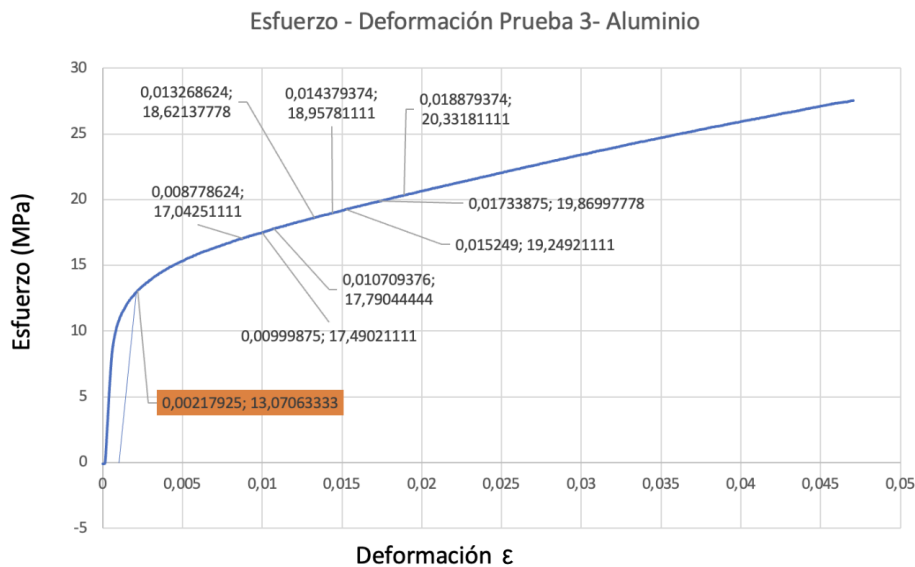
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el segundo ensayo de tracción en la aleación de aluminio.

Paso 1	-22,90	\bar{X} =	-1,64		
Sxy=	0,03	\bar{y} =	1,74	Paso 9	0,003
Paso 3	21,57	$n\bar{X}$ =	-0,19	Syy=	21,27
Sxx=	0,24	b=	1,94	S ² y=	3,54
		K (MPa) =	86,50	SDn ¹ 2=	14,58
n2=	0,12	log K=	1,94	SDn2=	3,82

Nota. Tabla del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el segundo ensayo de la aleación de aluminio.

Figura 103.

Selección de pares de datos para el tercer ensayo de tracción en la aleación de aluminio comercial.



Nota. Imagen de la selección de pares de datos para el tercer ensayo de aleación de aluminio.

Tabla 42.

Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el tercer ensayo de tracción en la aleación de aluminio comercial

Par de datos	Carga, F (N)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real, σ , (MPa)	Sección de Ensayo de la Probeta (mm)	$Y = \log_{10}(\sigma)$	Y^2	Extensión, mm	Deformación Ingenieril, ϵ	Deformación Real, ϵ	$X = \log_{10}(\epsilon)$	X^2	XY
1	153	17	17	50	1,23	1,52	0,44	0,01	0,01	-2,06	4,24	-2,54
2	157	17	18	50	1,24	1,54	0,50	0,01	0,01	-2,00	4,00	-2,49
3	160	18	18	50	1,25	1,56	0,53	0,01	0,01	-1,97	3,89	-2,46
4	168	19	19	50	1,27	1,61	0,66	0,01	0,01	-1,88	3,53	-2,38
5	171	19	19	50	1,28	1,63	0,72	0,01	0,01	-1,84	3,40	-2,35
6	173	19	20	50	1,28	1,65	0,76	0,02	0,02	-1,82	3,31	-2,34
7	179	20	20	50	1,30	1,69	0,87	0,02	0,02	-1,76	3,10	-2,29
8	183	20	21	50	1,31	1,71	0,94	0,02	0,02	-1,72	2,97	-2,26
				Σ	10,16	12,91			Σ	-15,06	28,43	-19,10

Nota. Tabla del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el tercer ensayo de la aleación de aluminio.

Tabla 43.

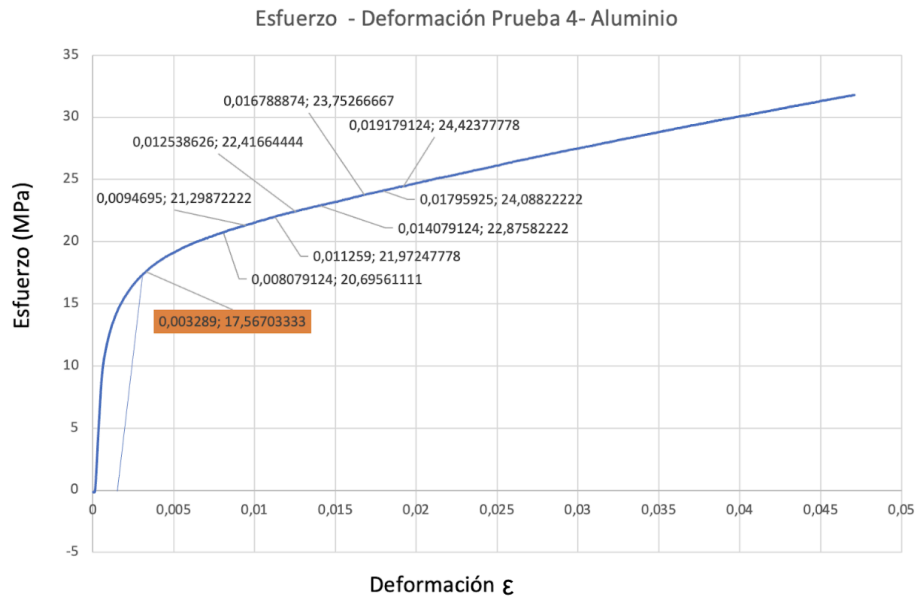
Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el tercer ensayo de tracción en la aleación de aluminio.

Paso 1	-19,12	$\bar{X} =$	-1,88		
$S_{xy} =$	0,02	$\bar{y} =$	1,27	Paso 9	0,01
Paso 3	28,33	$n\bar{X} =$	-0,43	$S_{yy} =$	11,30
$S_{xx} =$	0,10	$b =$	1,70	$S^2 y =$	1,88
		K (MPa) =	50,16	$SDn^2 =$	19,12
$n3 =$	0,23	$\log K =$	1,70	$SDn3 =$	4,37

Nota. Tabla del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el tercer ensayo de la aleación de aluminio.

Figura 104.

Selección de pares de datos para el cuarto ensayo de tracción en la aleación de aluminio comercial.



Nota. Imagen de la selección de pares de datos para el cuarto ensayo de aleación de aluminio.

Tabla 44.

Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el cuarto ensayo de tracción en la aleación de aluminio comercial.

Par de datos	Carga, F (N)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real, σ , (MPa)	Sección de Ensayo de la Probeta (mm)	$Y = \log_{10}(\sigma)$	Y^2	Extensión, mm	Deformación Ingenieril, ϵ	Deformación Real, ϵ	$X = \log_{10}(\epsilon)$	X^2	XY
1	186	21	21	50	1,32	1,73	0,40	0,01	0,01	-2,10	4,40	-2,76
2	192	21	21	50	1,33	1,76	0,47	0,01	0,01	-2,02	4,10	-2,69
3	198	22	22	50	1,34	1,80	0,56	0,01	0,01	-1,95	3,80	-2,61
4	202	22	23	50	1,35	1,82	0,63	0,01	0,01	-1,90	3,62	-2,57
5	206	23	23	50	1,36	1,85	0,70	0,01	0,01	-1,85	3,43	-2,52
6	214	24	24	50	1,38	1,89	0,84	0,02	0,02	-1,78	3,15	-2,44
7	217	24	25	50	1,38	1,91	0,90	0,02	0,02	-1,75	3,05	-2,41
8	220	24	25	50	1,39	1,93	0,96	0,02	0,02	-1,72	2,95	-2,38
				Σ	10,84	14,70			Σ	-15,06	28,49	-20,39

Nota. Tabla del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el cuarto ensayo de la aleación de aluminio.

Tabla 45.

Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el cuarto ensayo de tracción en la aleación de aluminio.

Paso 1	-20,41	$\bar{X} =$	-1,88		
Sxy=	0,02	$\bar{y} =$	1,36	Paso 9	0,00
Paso 3	28,36	$n\bar{X} =$	-0,36	Syy=	12,86
Sxx=	0,13	b=	1,71	S ² y=	2,14
		K (MPa) =	51,66	SDn ¹ 2=	16,59
n4=	0,19	log K=	1,71	SDn4=	4,07

Nota. Tabla del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el cuarto ensayo de la aleación de aluminio.

Figura 105.

Selección de pares de datos para el quinto ensayo de tracción en la aleación de aluminio comercial.



Nota. Imagen de la selección de pares de datos para el quinto ensayo de aleación de aluminio.

Tabla 46.

Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el quinto ensayo de tracción en la aleación de aluminio comercial.

Par de datos	Carga, F (N)	Esfuerzo Ingenieril (MPa)	Esfuerzo Real, σ , (MPa)	Sección de Ensayo de la Probeta (mm)	$Y = \log 10 (\sigma)$	Y^2	Extensión, mm	Deformación Ingenieril, ϵ	Deformación Real, ϵ	$X = \log 10 (\epsilon)$	X^2	XY
1	154	11	11	50	1,03	1,06	0,39	0,01	0,01	-2,11	4,45	-2,17
2	157	11	11	50	1,04	1,08	0,43	0,01	0,01	-2,06	4,26	-2,14
3	163	11	11	50	1,05	1,11	0,52	0,01	0,01	-1,99	3,94	-2,09
4	168	12	12	50	1,07	1,14	0,60	0,01	0,01	-1,92	3,70	-2,05
5	171	12	12	50	1,07	1,16	0,65	0,01	0,01	-1,88	3,55	-2,02
6	176	12	12	50	1,09	1,18	0,73	0,01	0,01	-1,83	3,36	-1,99
7	180	12	13	50	1,10	1,20	0,80	0,02	0,02	-1,79	3,22	-1,97
8	183	13	13	50	1,10	1,22	0,88	0,02	0,02	-1,76	3,08	-1,94
				Σ	8,55	9,14			Σ	-15,35	29,57	-16,38

Nota. Tabla del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el quinto ensayo de la aleación de aluminio.

Tabla 47.

Cálculos para la determinación del coeficiente n y la constante K para el quinto ensayo de tracción en la aleación de aluminio.

Paso 1	-16,40	$\bar{X} =$	-1,92		
$S_{xy} =$	0,02	$\bar{y} =$	1,07	Paso 9	0,01
Paso 3	29,46	$n\bar{X} =$	-0,41	$S_{yy} =$	7,99
$S_{xx} =$	0,11	$b =$	1,48	$S^2 y =$	1,33
		K (MPa) =	30,36	$SDn1^2 =$	11,82
$n5 =$	0,22	$\log K =$	1,48	$SDn5 =$	3,44

Nota. Tabla del cálculo de datos para la determinación del coeficiente de endurecimiento y la constante de deformación para el quinto ensayo de la aleación de aluminio.

Anexo 5. Probetas después de la fractura de Acero ASTM A500

En este anexo se muestran las probetas de acero ASTM A500 después del ensayo de tracción.

Figura 106.

Probeta fracturada del primer ensayo de tracción.



Nota. Imagen de la dirección de fractura de la probeta de acero ASTM A500 en el primer ensayo.

Figura 107.

Probeta fracturada del segundo ensayo de tracción.



Nota. Imagen de la dirección de fractura de la probeta de acero ASTM A500 en el segundo ensayo.

Figura 108.

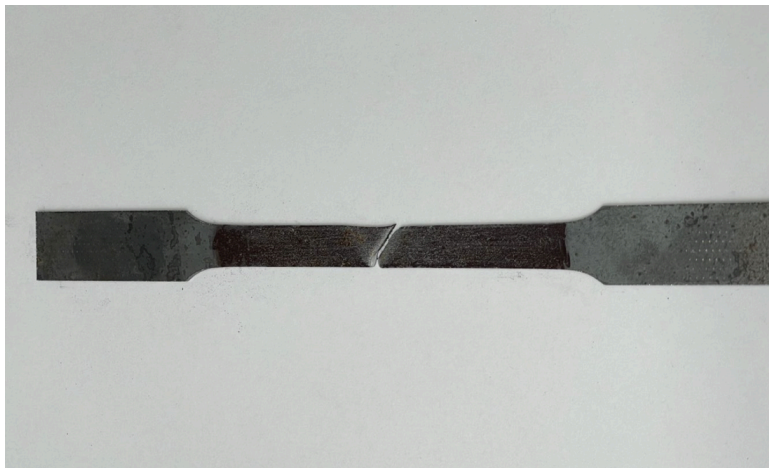
Probeta fracturada del tercer ensayo de tracción.



Nota. Imagen de la dirección de fractura de la probeta de acero ASTM A500 en el tercer ensayo.

Figura 109.

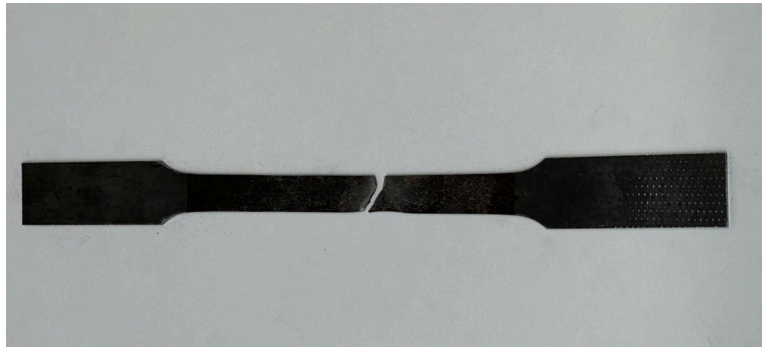
Probeta fracturada del cuarto ensayo de tracción.



Nota. Imagen de la dirección de fractura de la probeta de acero ASTM A500 en el cuarto ensayo.

Figura 110.

Probeta fracturada del quinto ensayo de tracción.



Nota. Imagen de la dirección de fractura de la probeta de acero ASTM A500 en el quinto ensayo.

Figura 111.

Probeta fracturada del sexto ensayo de tracción.



Nota. Imagen de la dirección de fractura de la probeta de acero ASTM A500 en el sexto ensayo.

Figura 112.

Probeta fracturada del séptimo ensayo de tracción.



Nota. Imagen de la dirección de fractura de la probeta de acero ASTM A500 en el séptimo ensayo.

Figura 113.

Probeta fracturada del octavo ensayo de tracción.



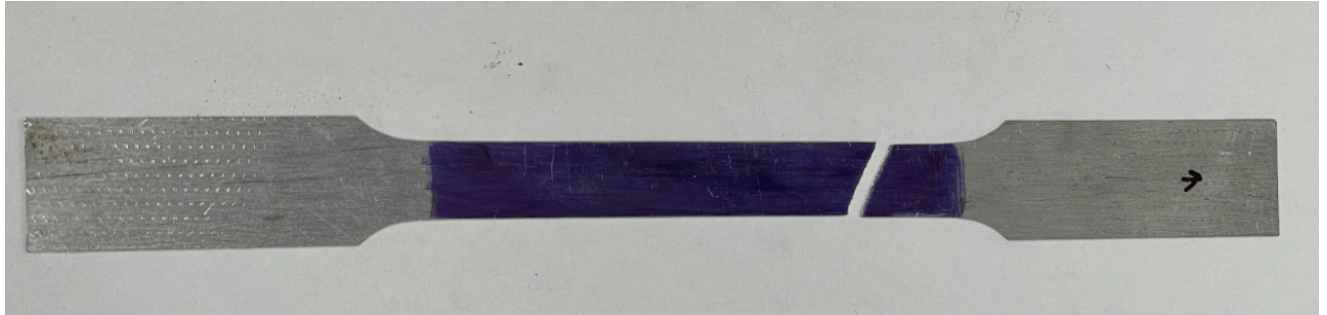
Nota. Imagen de la dirección de fractura de la probeta de acero ASTM A500 en el octavo ensayo.

Anexo 6. Probetas después de la fractura de la aleación de aluminio comercial

En este anexo se muestran las probetas de aleación de aluminio comercial después del ensayo de tracción.

Figura 114.

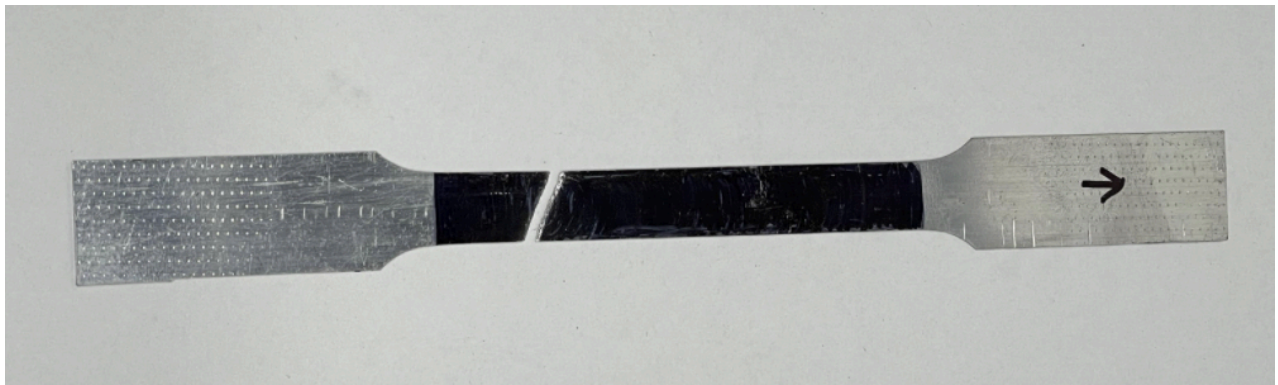
Probeta fracturada del primer ensayo de tracción.



Nota. Imagen de la dirección de fractura de la probeta de aleación de aluminio estructural en el primer ensayo.

Figura 115.

Probeta fracturada del segundo ensayo de tracción.



Nota. Imagen de la dirección de fractura de la probeta de aleación de aluminio estructural en el segundo ensayo.

Figura 116.

Probeta fracturada del tercer ensayo de tracción.



Nota. Imagen de la dirección de fractura de la probeta de aleación de aluminio estructural en el tercer ensayo.

Figura 117.

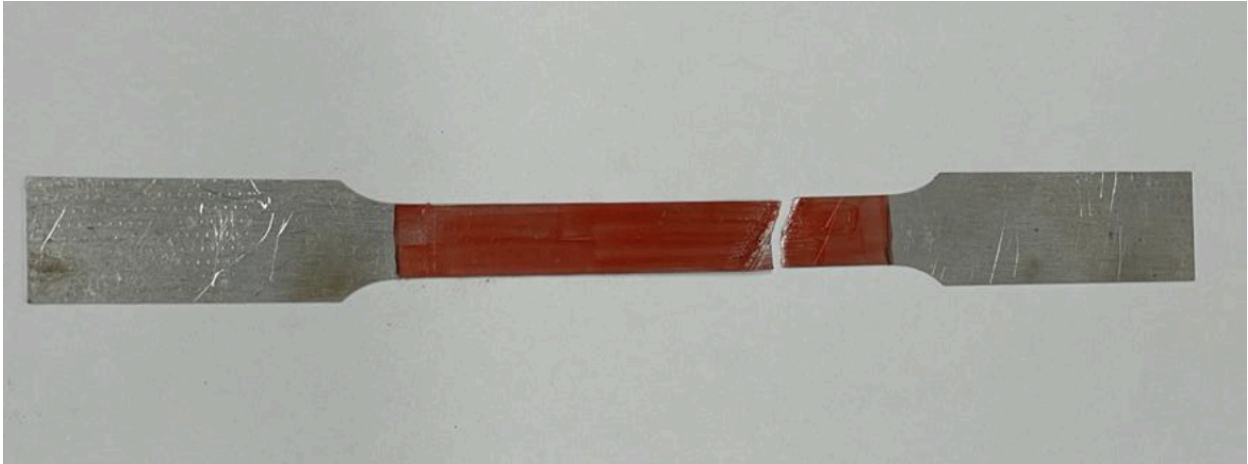
Probeta fracturada del cuarto ensayo de tracción.



Nota. Imagen de la dirección de fractura de la probeta de aleación de aluminio estructural en el cuarto ensayo.

Figura 118.

Probeta fracturada del quinto ensayo de tracción.



Nota. Imagen de la dirección de fractura de la probeta de aleación de aluminio estructural en el quinto ensayo.

Anexo 7. Parámetros iniciales para el ensayo de tracción

Figura 119.

Parámetros del sistema o tipo de ensayo.

The screenshot shows the 'Configuración de sistema' window in the TRAPEZIUM X software. The window is divided into several sections:

- Modo de Ensayo:** Set to 'Sencillo'.
- Tipo de ensayo:** Set to 'Traccion'.
- Polaridad de Fuerza:** Set to 'Traccion'.
- Sentido de Fuerza:** Set to 'Arriba'.
- Unidad:** Radio buttons for 'SI' (selected) and 'Ingles'. A list of units is shown: Fuerza (kN), Despl. (mm), Tension (N/mm2), Deformacion (%), Tiempo (seg), M Elastico (N/mm2), Pendiente (N/mm), and Energia (J).
- Formato:** A 'Redondeo' dropdown set to 'Redondeo'. A list of format options is shown: Fuerza (Auto), Despl. (Auto), Tension (Auto), Deformacion (Auto), Tiempo (Auto), M Elastico (Auto), Pendiente (Auto), Energia (Auto), and Valor n (Auto).
- Accesorios:** Buttons for 'Nueva columna' and 'Borrar'. A table with columns 'Tipo', 'Nombre', and 'Comentarios' is present.
- Extensometro:** Buttons for 'Nueva columna' and 'Borrar'. A table with columns 'Tipo', 'Nombre', and 'Comentarios' is present.
- Camara termostatica:** Buttons for 'Nueva columna' and 'Borrar'. A table with columns 'Tipo', 'Nombre', and 'Comentarios' is present.
- Otros:** Buttons for 'Nueva columna' and 'Borrar'. A table with columns 'Nombre' and 'Comentarios' is present.

Navigation buttons '< Atras' and 'Siguiete >' are at the bottom.

Nota. Se asignan valores de entrada en las unidades de medida.

Figura 120.

Parámetros del sensor de unidades de medida.

The screenshot shows the 'Configuración de sensores' window in the TRAPEZIUM X software. The window is divided into several sections:

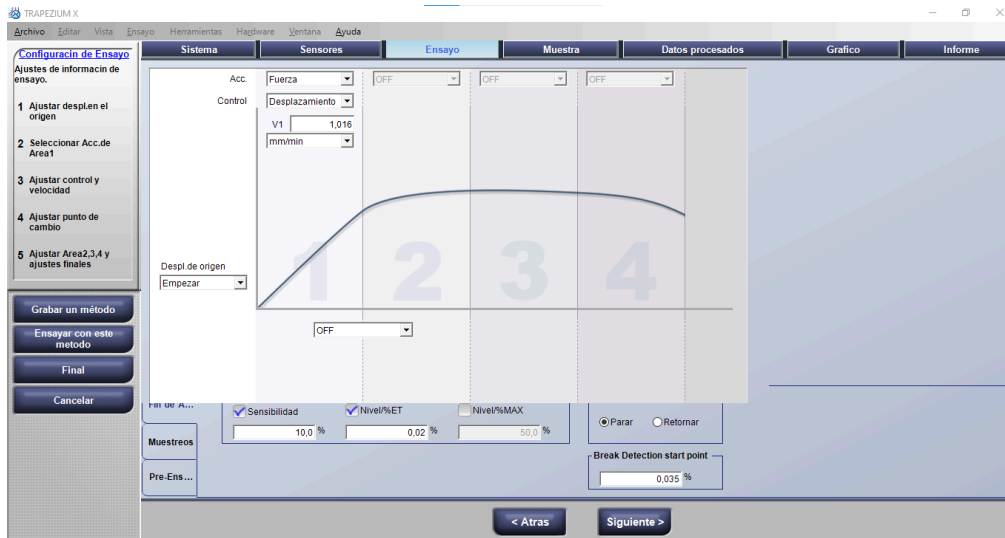
- Canal:** A list of channels with the following settings:
 - Fuerza:** Canal: 'Fuerza Amp.', Nombre: 'Fuerza', Escala total: '50' kN, Limite: '50' kN, Lower Limit: '-50' kN.
 - Despla...:** (partially visible)
 - Extens...:** Nombre: 'Tension'.
 - Sensor...:** Use True Stress.
 - Otros:** (empty)
 - Define:** (empty)
- Sensores:** A list of sensors:
 - 1: 'Fuerza'
 - 2: 'Desplazamiento'
 - 3: 'ninguno'
- Tamaños:** Radio buttons for 'Pequeño', 'Estandar' (selected), and 'Grande'.

Navigation buttons '< Atras' and 'Siguiete >' are at the bottom.

Nota. Se coloca parámetro de fuerza y limites

Figura 121.

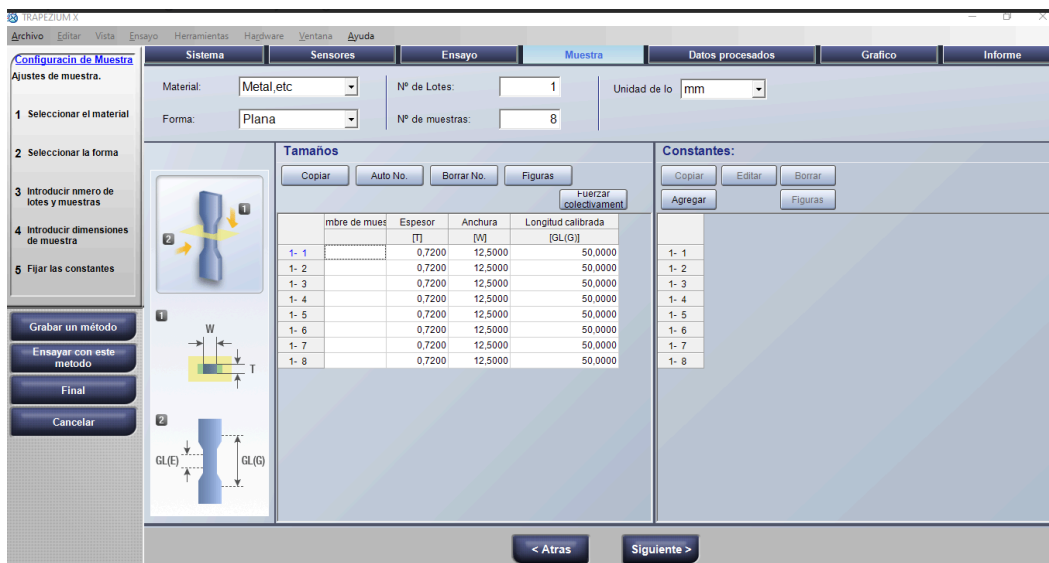
Parámetros del ensayo en tipo de gráfico.



Nota. Se visualiza la curva que será analizada.

Figura 122.

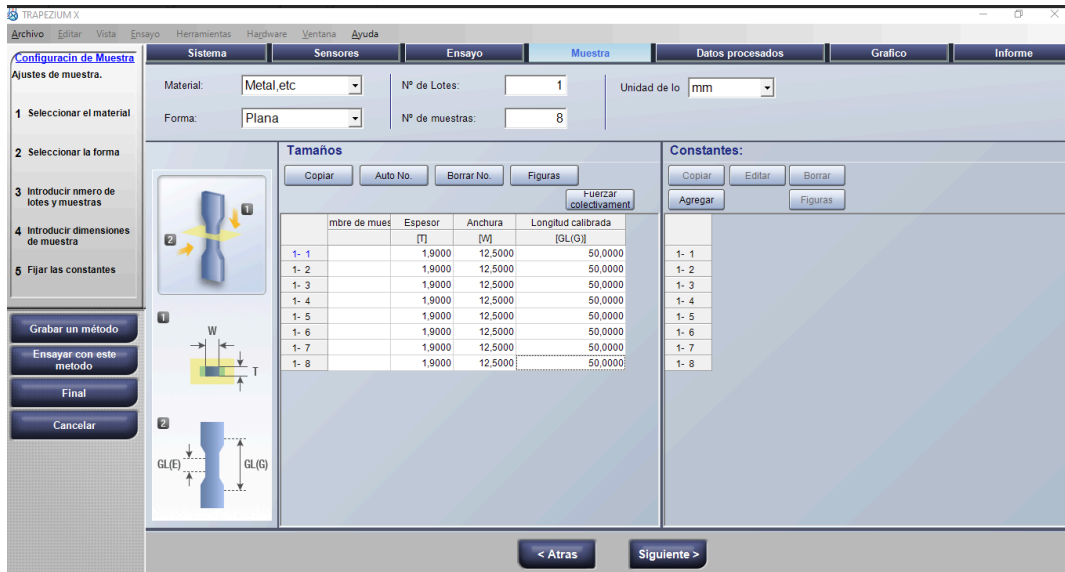
Parámetros de la probeta o muestra aleación de aluminio.



Nota. Valores de la probeta con datos de entrada para el aluminio.

Figura 123.

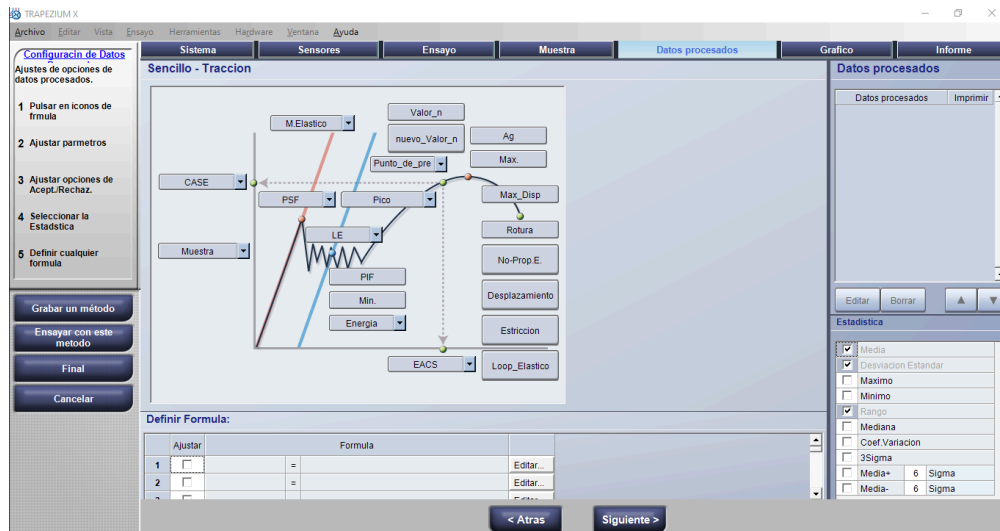
Parámetros de la probeta o muestra acero ASTM A500.



Nota. Valores de la probeta con datos de entrada para el acero ASTM A500.

Figura 124.

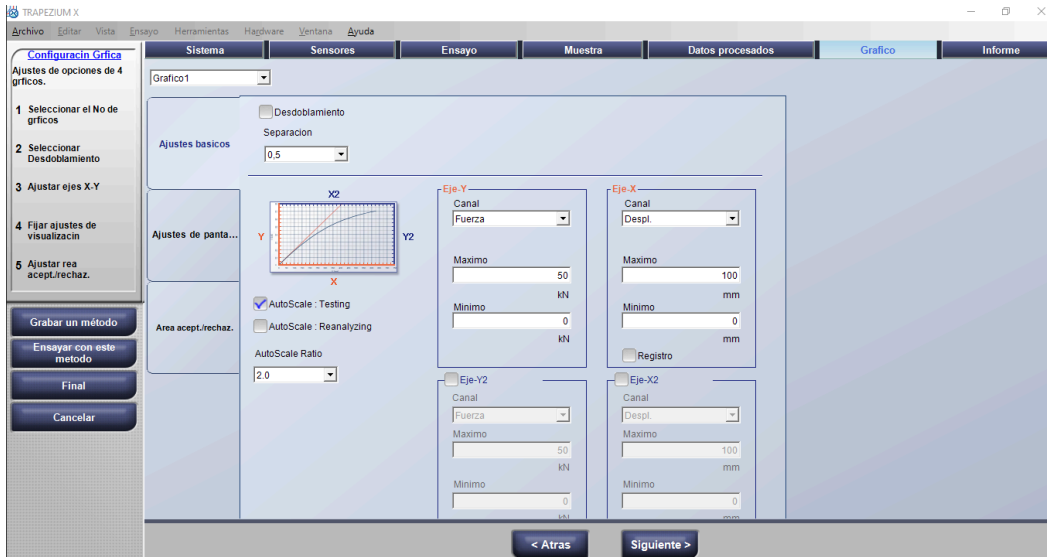
Parámetros de procesamiento de los datos.



Nota. Valores que se encontraran en el gráfico y los cuales serán extraídos.

Figura 125.

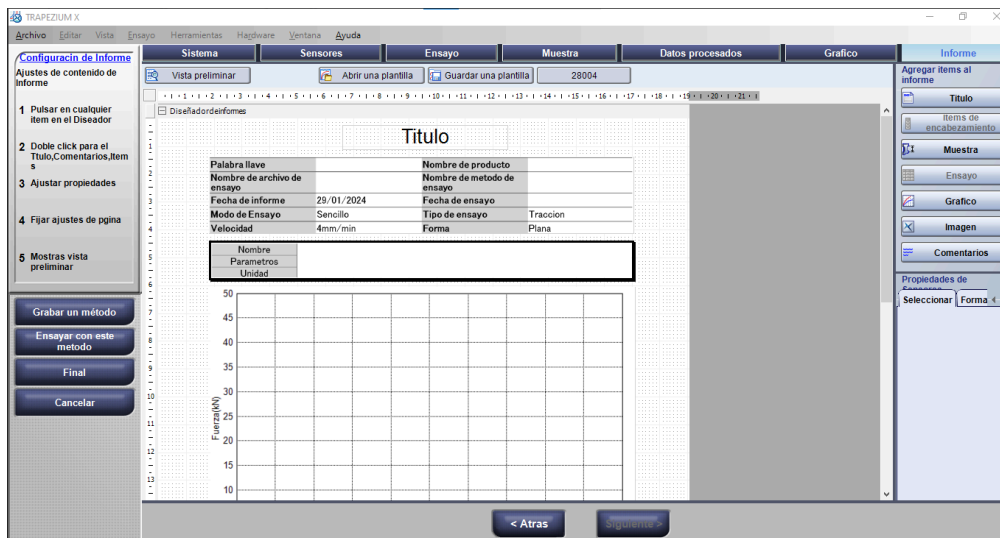
Parámetros de ejes coordenados.



Nota. Asignación de ejes y valores de entrada.

Figura 126.

Informe final de la máquina.



Nota. Hoja de valores y presentación de los resultados del ensayo de tracción.