

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

INFLUENCIA DEL ESPESOR DE UN RECUBRIMIENTO SOBRE LAS PROPIEDADES PLÁSTICAS ESTIMADAS POR INDENTACIÓN NORMAL

Presentado ante la Ilustre Universidad

Central de Venezuela por los Brs:

Barrios G., Diego A.

Fuentes A., Emilio J.

Para optar al título de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2008

TRABAJO ESPECIAL DE GRADO

INFLUENCIA DEL ESPESOR DE UN RECUBRIMIENTO SOBRE LAS PROPIEDADES PLÁSTICAS ESTIMADAS POR INDENTACIÓN NORMAL

Tutor Académico: Prof. Alberto Pertuz

Presentado ante la Ilustre Universidad

Central de Venezuela por los Brs:

Barrios G., Diego A.

Fuentes A., Emilio J.

Para optar al título de Ingeniero Mecánico

Caracas, 2008

ACTA

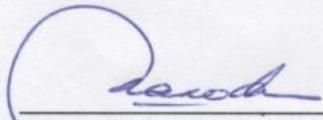
Los abajo firmantes, Miembros del jurado designado por el consejo de Escuela de Ingeniería Mecánica, para evaluar el Trabajo Especial de Grado presentado por los Bachilleres **DIEGO BARRIOS** y **EMILIO FUENTES**, y que lleva por título:

“INFLUENCIA DEL ESPESOR DE UN RECUBRIMIENTO SOBRE LAS PROPOIEDADES PLÁSTICAS ESTIMADAS POR INDENTACIÓN NORMAL”

Considerando que el referido Trabajo, cumple con los requisitos exigidos por el plan de estudios conducente al título de Ingenieros Mecánicos.

Acta se firma en conformidad, en la ciudad de Caracas, a los ocho días del mes de Mayo del año dos mil ocho.





Prof. María de los A. Prato



Prof. José Chitty



Prof. Crisanto Villalobos
Tutor suplente

DEDICATORIA

A mis Padres, Hermanos.....

A mi NOVIA.... Elisa Marcela F.

Diego

Primeramente dedico este proyecto a Dios, por ser el guía en cada una de las cosas que hago en mi vida.

A mis Padres, por haberme enseñado siempre el camino correcto que se debe seguir y así poder cumplir cada una de mis metas.

A mis hermanos quienes han sido mi ejemplo de lucha. Gracias por estar siempre ahí.

Emilio

AGRADECIMIENTOS

En primer lugar queremos agradecerle a Dios quien ha sido y seguirá siendo nuestro soporte y el motor de nuestras vidas, además de ser el total responsable de colocarnos en el camino a todas las personas y situaciones que fueron de gran importancia y ayuda para la culminación exitosa de éste trabajo y aún mas importante de ésta carrera.

El más sincero y especial agradecimiento a nuestra UNIVERSIDAD CENTRAL DE VENEZUELA, la cual nos brindo aparte de valiosos conocimientos, inestimables experiencias y momentos que nunca olvidaremos. A esta familia Ucevista a la cual nos honra pertenecer.

A nuestros Padres por darnos todo el apoyo y amor del mundo, por ser nuestro mas firme ejemplo y por creer en que lo lograríamos....Todo lo que somos se lo debemos a ustedes.

Al Prof. Alberto Pertuz por haber creído en nosotros y habernos dado la posibilidad de desarrollar tan importante proyecto. Por brindarnos su valiosa orientación.

Indiscutiblemente a el Prof. Crisanto Villalobos por habernos brindado incontables veces su apoyo, conocimientos e ideas. Has sido soporte y amigo.

Al laboratorio de Ensayos Mecánicos de la Escuela de Metalurgia y a todos los que en él laboran por la gran ayuda brindada.

A la empresa Plasmatec Ingenieros C.A. y en especial al Prof. Andrea Scagni, por la toda la ayuda prestada para la realización de este proyecto.

Al departamento de Ensayos no Destructivos, y a los profesores que trabajan allí por la ayuda brindada.

A la empresa Productos RP y a todos sus trabajadores por brindarnos su ayuda durante la fabricación de la probetas.

A todos los seres especiales y amigos que alegran y le dan mas sentido a nuestras vidas. Gracias a ustedes el camino al éxito se ha hecho mas corto y grato por lo que queremos que nos acompañen en nuestro logro y satisfacción.

Barrios G., Diego A; Fuentes A., Emilio J.

**INFLUENCIA DEL ESPESOR DE UN RECUBRIMIENTO
SOBRE LAS PROPIEDADES PLÁSTICAS
ESTIMADAS POR INDENTACIÓN NORMAL**

**Tutor Académico: Prof. Alberto Pertuz. Tesis. Caracas, U.C.V. Facultad de
Ingeniería, Escuela de Mecánica. 2008, N° de páginas 97**

Palabras Claves: Recubrimiento Colmonoy 88, Indentación Brinell, Relaciones de Tabor.

RESUMEN

El presente trabajo se realizó con el objetivo de estimar las propiedades plásticas de un recubrimiento, a través del ensayo de indentación normal. Se verificaron las Relaciones Empíricas de Tabor[24] para tres materiales: 1) Acero AISI 4140 (Q&T); 2) Cobre C10100; y 3) Aluminio AA6063-T5. Para ello se realizó el Ensayo de Tracción Uniaxial e Indentación Brinell. Los datos de esfuerzo y deformación experimentales de cada ensayo fueron modelados usando las ecuaciones de Hollomon[19], Voce[12], y Swift[19]. Luego se procedió a la comparación de las Curvas Esfuerzo-Deformación entre ambos ensayos. Se realizó el Ensayo de Tracción para probetas de Acero AISI 4140 (Q&T) recubiertas con diferentes espesores de Colmonoy 88, y no se observó diferencia cuantitativa entre los valores de carga máxima de cada ensayo realizado. Sin embargo, al realizar indentación al mismo sistema (sustrato/recubrimiento) se apreció una diferencia cuantitativa en el valor de dureza con respecto al valor teórico del recubrimiento, es decir es un valor de dureza compuesta. Con el modelo Lesage-Pertuz[16] se calcularon valores de dureza del recubrimiento, en función de la carga aplicada; pero esto sólo fue posible en el recubrimiento de 0,6mm de espesor. Aplicando las relaciones empíricas de Tabor se convirtieron estos valores en esfuerzo-deformación y se construyó la curva del recubrimiento.

ÍNDICE DE CONTENIDO

DEDICATORIA	iii
AGRADECIMIENTOS	iv
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE TABLAS	x
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
INTRODUCCIÓN	1
CAPITULO I: MARCO TEÓRICO	3
1.1.- ANTECEDENTES.....	3
1.2.- RECUBRIMIENTO	6
1.3.- TERMORROCIADO	7
1.3.1.-Características	8
1.3.2.-Material de Alimentación	9
1.3.3.-Sustratos	9
1.3.4.- Propiedades del proceso de termorrociado.....	10
1.3.5.- Tipos de Termorrociado	11
1.3.5.1-Procesos de Combustión.....	11
1.3.5.1.1-Proceso por Llama	11
1.3.5.1.2- Rociado por HVOF (High Velocity Oxygen Fuel).....	12
1.3.5.1.3- Rociado por Detonación	13
1.3.5.2- Procesos Eléctricos	14
1.3.5.2.1- Proyección al arco eléctrico	14
1.3.5.2.2- Proyección en plasma	14
1.3.6.-Aplicaciones del proceso de termorrociado:	15
1.4.- ENSAYO DE INDENTACIÓN.....	15

1.4.1.-Principios del método	16
1.4.2.- Tipos de Ensayos de Indentación.	17
1.4.2.1.- Ensayo Brinell.	17
1.4.2.2.- Ensayo Rockwell.	18
1.4.2.3.- Ensayo Vickers.	19
1.4.2.4.- Ensayo Knoop.....	21
1.5.- ENSAYO DE TRACCION UNIAXIAL Y CURVA DE ESFUERZO- DEFORMACIÓN.....	23
1.6.- TRATAMIENTOS TÉRMICOS	32
1.6.1.- Temple.....	32
1.6.2.- Revenido.....	38
1.6.3.- Recocido.....	39
CAPÍTULO II: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL.....	41
2.1.-MATERIAL BASE.....	41
2.1.1- MAQUINADO Y PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS.....	43
2.1.2.- RECOCIDO DEL COBRE.	45
2.2.- RECUBRIMIENTO	46
2.2.1.- DEPOSICIÓN DEL RECUBRIMIENTO.....	47
2.2.2.- DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO.	47
2.3- ENSAYOS DE INDENTACIÓN	49
2.4.- ENSAYOS DE TRACCIÓN UNIAXIAL.....	50
2.5.- CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA DE ESFUERZO CONTRA DEFORMACION A PARTIR DE INDENTACION.....	51
2.6.- CURVAS DEL SISTEMA SUSTRATO-RECUBRIMIENTO.....	53
CAPÍTULO III: ANÁLISIS Y RESULTADOS.....	54
3.1 ENSAYO DE TRACCIÓN UNIAXIAL	54
3.2 ENSAYO DE INDENTACIÓN	62

3.3.-COMPARACIÓN DE LAS CURVAS ESFUERZO - DEFORMACIÓN OBTENIDAS POR EL ENSAYO DE TRACCIÓN UNIAXIAL Y POR INDENTACIÓN.	69
3.4 SISTEMA SUSTRATO/RECUBRIMIENTO.	84
CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	91
REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	93

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla I.1. Beneficios del proceso HVOF	13
Tabla II.1. Composición nominal del Acero AISI 4140 (Q&T)[10].	42
Tabla II.2. Composición nominal del Aluminio 6063-T5[25].	43
Tabla II.3 Especificación de la cantidad y tipo de probetas utilizadas, con sus respectivas normas.	45
Tabla II.4 Composición química del Colmonoy 88[20].....	46
Tabla II.5 Cargas utilizadas para cada material a ensayar.....	49
Tabla III.1 Valores del ensayo de tracción del aluminio AA6063-T5.	55
Tabla III.2 Valores del ensayo de tracción del cobre C10100.....	56
Tabla III.3 Valores del ensayo de tracción del acero AISI 4140 (Q&T).....	57
Tabla III.4 Valores del ensayo de tracción Acero AISI 4140(Q&T)/Colmonoy 88.....	58
Tabla III.5 Valores del ensayo de indentación (Aluminio AA6063T5).....	63
Tabla III.6 Valores para obtener el coeficiente de Tabor (Aluminio AA6063T5).	64
Tabla III.7 Coeficientes de Tabor asociados a los modelos (Aluminio AA6063T5).	64
Tabla III.8 Valores del ensayo de indentación (Cobre C10100).....	65
Tabla III.9 Valores para obtener el coeficiente de Tabor (Cobre C10100).....	65
Tabla III.10 Coeficientes de Tabor asociados a los modelos (Cobre C10100) ...	66
Tabla III.11 Valores del ensayo de indentación (Acero AISI 4140 Q&T).....	66
Tabla III.12 Valores para obtener el coeficiente de Tabor (Acero AISI 4140 Q&T).	67
Tabla III.13 Coeficientes de Tabor asociados a los modelos (Acero AISI 4140 Q&T).	67
Tabla III.14 Valores del ensayo de indentación para la probeta de recubierta (espesor = 0,6mm).....	68
Tabla III.15 Valores del ensayo de indentación (espesor = 0,4mm).....	68
Tabla III.16 Valores del ensayo de indentación para la probeta de recubierta (espesor = 0,2mm).....	68

Tabla III.17 Valores esfuerzo y deformación modeladas por Hollomon (Aluminio AA6063-T5).....	69
Tabla III.18 Propiedades mecánicas del Aluminio AA6063-T5 obtenidas por Hollomon.	70
Tabla III.19 Valores de esfuerzo y deformación del ensayo de indentación y tracción (zonas plásticas) modeladas por Voce (Aluminio AA6063-T5).....	71
Tabla III.20 Valores de esfuerzo y deformación del ensayo de indentación (zona plástica) modeladas por Swift (Aluminio AA6063-T5).....	72
Tabla III.21 Valor de coeficiente de correlación al cuadrado (Aluminio AA6063-T5).....	73
Tabla III.22 Valores de esfuerzo y deformación del ensayo de indentación y tracción (zona plástica) modeladas por Hollomon (Cobre C10100).....	74
Tabla III.23 Propiedades mecánicas del Cobre C10100 obtenidas por Hollomon.	75
Tabla III.24 Valores de esfuerzo y deformación del ensayo de indentación y tracción (zona plástica) modeladas por Voce (Cobre C10100).	76
Tabla III.25 Valores de esfuerzo y deformación del ensayo de indentación y tracción (zona plástica) modeladas por Swift (Cobre C10100).	77
Tabla III.26 Valores de coeficiente de correlación al cuadrado para Cobre C10100.	78
Tabla III.27 Valores de esfuerzo y deformación del ensayo de indentación y tracción (zona plástica) modeladas por Hollomon (Acero AISI 4140 (Q&T)). ...	79
Tabla III.28 Propiedades mecánicas del Acero AISI 4140 (Q&T) obtenidas por Hollomon.	80
Tabla III.29 Valores de esfuerzo y deformación del ensayo de indentación y tracción (zona plástica) modeladas por Voce (Acero AISI 4140 (Q&T)).	81
Tabla III.30 Valores de esfuerzo y deformación del ensayo de indentación y tracción (zona plástica) modeladas por Swift (Acero AISI 4140 (Q&T)).	82
Tabla III.31 Valor de coeficiente de correlación al cuadrado (Acero AISI 4140 (Q&T)).	83
Tabla III.32 Valores del ensayo de tracción para las probetas de Acero AISI 4140 (Q&T) recubiertas con Colmonoy 88.	85

Tabla III.33 Valores de dureza Brinell del sustrato “Hs” (Acero AISI 4140 (Q&T)), del sistema sustrato/recubrimiento “Hc” (Acero AISI 4140 (Q&T)/Colmonoy88) y profundidad relativa de indentación “RID”.....	86
Tabla III.34 Valores de dureza Brinell del recubrimiento obtenidos utilizando el modelo de Lesage-Pertuz.	89
Tabla III.35 Valores de esfuerzo y deformación del Colmonoy 88.	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura I.1 Sección transversal de una superficie recubierta por Termorrociado	9
Figura I.2 Esquema de la indentación Brinell. (a) Etapa de aplicación de carga, (b) Huella residual.....	17
Figura I.3 Esquema de la indentación Rockwell C[21].....	19
Figura I.4 Esquema de la indentación Vickers.....	20
Figura I.5 Esquema del indentor Knoop.....	22
Figura I.6 Probeta plana para ensayo de tracción	24
Figura I.7 Curva Esfuerzo vs Deformación	24
Figura I.8 Endurecimiento de Trabajo[19].....	26
Figura I.9 Esfuerzo y deformación reales, comparados con la curva normal de esfuerzo vs deformación	29
Figura I.10 Curvas de enfriamiento en el diagrama T-I de un acero al 0.45% de Carbono[7]	34
Figura I.11 Región del diagrama de fases hierro-carbono próximo al eutectoide, donde se indican las temperaturas de tratamiento térmico del acero[7].	40
Figura II.1 Probeta de ensayo de tracción.....	44
Figura II.2 Probeta de ensayo de indentación.....	44
Figura II.3. a) Horno para tratamiento térmico. b) Extracción de la probeta de tracción de cobre.....	46
Figura II.4 Probetas para ensayos de indentación (superior) y de tracción (inferior).....	49
Figura II.5 a) Máquina de Indentación. b) Lente visor.....	50
Figura II.6 Máquina Universal de Ensayos	51
Figura III.1 Curva carga vs elongación (Aluminio AA6063T5).....	59
Figura III.2 Curva esfuerzo vs deformación (Aluminio AA6063T5).....	59
Figura III.3 Curva carga vs elongación (Cobre C10100).....	60
Figura III.4 Curva esfuerzo vs deformación (Cobre C10100).....	60
Figura III.5 Curva carga vs elongación (Acero AISI 4140 Q&T).....	61
Figura III.6 Curva esfuerzo vs deformación (Acero AISI 4140 Q&T).....	61

Figura III.7 Curva esfuerzo vs deformación modeladas por Hollomon (Aluminio AA6063-T5).....	70
Figura III.8 Curva de esfuerzo vs deformación modeladas por Voce (Aluminio AA6063-T5).....	72
Figura III.9 Curva de esfuerzo vs deformación modeladas por Swift (Aluminio AA6063-T5).....	73
Figura III.10 Curvas esfuerzo vs deformación modeladas por Hollomon (Cobre C10100).....	75
Figura III.11 Curvas esfuerzo vs deformación modeladas por Voce (Cobre C10100).....	77
Figura III.12 Curvas esfuerzo vs deformación modeladas por Swift (Cobre C10100).....	78
Figura III.13 Curvas esfuerzo vs deformación modeladas Hollomon (Acero AISI 4140 (Q&T)).....	80
Figura III.14 Curvas esfuerzo vs deformación modeladas por Voce (Acero AISI 4140 (Q&T)).....	82
Figura III.15 Curvas esfuerzo vs deformación modeladas por Swift (Acero AISI 4140 (Q&T)).....	83
Figura III.16 Curva carga vs elongación probetas recubiertas y probeta de Acero AISI 4140 (Q&T).....	86
Figura III.17 Valores de Dureza compuesta vs Carga.....	88
Figura III.18 Curvas esfuerzo real deformación real del Colmonoy 88 modelada por Hollomon.....	90

INTRODUCCIÓN

En el campo de la ingeniería se necesita saber cómo responden los materiales sólidos a fuerzas externas como la tensión, la compresión, la torsión, la flexión o la cizalladura. Los materiales sólidos responden a dichas fuerzas con una deformación elástica (en la que el material vuelve a su tamaño y forma originales cuando se elimina la fuerza externa), una deformación permanente y finalmente puede ocurrir una fractura. En muchos materiales, entre ellos los metales y los minerales la deformación es directamente proporcional al esfuerzo, esta relación se conoce como Ley de Hooke. No obstante, si la fuerza externa supera un determinado valor (fluencia), el material puede quedar deformado permanentemente, y la Ley de Hooke ya no es válida. Esta última condición se presenta en el los procesos de manufactura (conformado, maquinado) y es allí donde se encuentra la importancia para el ingeniero de conocer el comportamiento de los materiales. El cual se puede obtener a través de la curva esfuerzo deformación.

Generalmente para conseguir las curvas de esfuerzo deformación se utiliza el ensayo de tracción, el cual consiste en la aplicación de una fuerza en dirección axial a una probeta hasta su fractura. La fabricación de las probetas para los ensayos de tracción requiere de un esfuerzo importante que involucra inversión de dinero, tiempo y otros factores. Es por ello que se han buscado métodos alternativos para la obtención de esta curva, como por ejemplo el ensayo de indentación, el que consiste en presionar un indenter sobre la superficie dejando una impresión sobre el material, y con el valor del área impresa por el indenter y la carga aplicada se pueden obtener algunas propiedades mecánicas. Es importante tomar en cuenta este tipo de ensayo debido a su versatilidad, sencillez y economía

Recientemente, los avances en recubrimientos, la tendencia a estudiar materiales mono o multicapa y el avance en la utilización de estas técnicas en campos tan dispares como la microelectrónica o el envasado, requieren de la necesidad de utilizar otro ensayo, que no sea el de tracción, para poder caracterizar las propiedades mecánicas de dichos recubrimientos y del propio componente. Es en este punto donde el ensayo de indentación es útil. La posibilidad de realizar sobre una superficie recubierta, un ensayo de indentación y el poder extraer propiedades mecánicas del recubrimiento y sustrato, hacen de esta técnica uno de los campos más atractivos en la caracterización de materiales.

CAPITULO I: MARCO TEÓRICO

1.1.- ANTECEDENTES

El primer ensayo de indentación-dureza ampliamente aceptado y estandarizado fue propuesto por J. A. Brinell[9] en 1900. Sin embargo, El primer paso importante encaminado a determinar las propiedades plásticas de un material mediante técnicas de indentación puede ser atribuido a Meyer, quien definió la dureza en función del área proyectada por el indentor[11], en vez del área superficial propuesta anteriormente por Brinell. La presión media entre la superficie del indentor y la huella es igual a la carga dividida por el área proyectada

$$P_m = \frac{P}{\pi * r^2} \quad (1.1)$$

donde

P_m = Presión media

P = Carga aplicada

r = Radio de la huella

Meyer propuso que la presión media debe ser tomada como valor de la dureza y también una relación empírica entre la carga y el tamaño de la huella. Esta relación es usualmente llamada ley de Meyer.

$$P = k * d^n \quad (1.2)$$

donde

P= Carga aplicada, Kg

d= Diámetro de la huella, mm

n´= Constante del material relacionada con el endurecimiento por deformación del metal.

k= Constante del material que expresa la resistencia del metal a la penetración.

El parámetro n´ es la pendiente de la línea recta obtenida cuando graficamos Log P contra Log d, y k es el valor de P para d=1. Un metal completamente recocido tiene un valor de n´ cercano a 2,5, mientras n´ es más o menos 2 para metales completamente endurecidos plásticamente. Este parámetro está relacionado con el coeficiente de endurecimiento por deformación de la ecuación de Hollomon. El exponente de la ley de Meyer es aproximadamente igual al coeficiente de endurecimiento por deformación más dos. Existe un valor mínimo límite en el cual por debajo de él no se puede aplicar la ley de Meyer. Si la carga es muy pequeña la deformación alrededor de ella no es totalmente plástica y la ecuación (1.2) no se aplica. Esta carga dependerá de la dureza del metal. Para una bola de 10mm de diámetro la carga debe exceder 50Kg para cobre con un BHN de 100, y para acero con una BHN de 400 la carga debe exceder 1,5Kg[9].

En 1951 Tabor[24] desarrolló un método empírico con el cual se calcula la deformación y esfuerzo real de un material, cuando éste se presenta un comportamiento plástico. Las expresiones propuestas por Tabor fueron las siguientes:

$$\sigma = \frac{p_m}{2.8} \quad (1.3)$$

$$\varepsilon = 0.2 \times \frac{d}{D} \quad (1.4)$$

donde

$$p_m = \frac{P}{A_{proj}} \quad (1.5)$$

d = Diámetro de contacto

D = Diámetro del Indentor

P_m = Presión media

A_{proj} = Área proyectada por el indentor

En la investigación realizada por Kang, Yao y Barbero[14], se verificaron experimentalmente las relaciones empíricas antes mencionadas. Para ello desarrollaron simulaciones de indentación esférica por elemento finito a una serie de materiales dúctiles. Los resultados obtenidos en las simulaciones por elemento finito fueron comparados con los valores esfuerzo-deformación después del punto de fluencia para un ensayo de tracción, mediante esta comparación se obtuvieron valores semejantes.

Recientemente se han desarrollado trabajos relacionados a la obtención de las propiedades mecánicas por nanoindentación tal es el caso de M. Mata, M. Anglada, J. Alcalá et al.[17] que utilizaron técnicas de microindentación instrumentalizada para la evaluación del comportamiento elastoplástico de materiales. La coincidencia entre las modelizaciones por elementos finitos de la mecánica del contacto de indentores cónicos y las observaciones experimentales

de indentación Vickers permiten establecer una metodología para la evaluación del módulo de Young, dureza y coeficiente de endurecimiento a partir de las curvas de carga aplicada (P)-profundidad de penetración (h) medidas mediante indentación instrumentalizada. Se presta especial énfasis al estudio de los fenómenos de apilamiento y hundimiento alrededor del área de contacto, y a establecer su correlación con el coeficiente de endurecimiento del material indentado. Los resultados de esta investigación permiten la evaluación directa del área de contacto a partir de las mediciones de profundidad de penetración. Este es un aspecto clave en la automatización de metodologías de indentación instrumentalizada.

1.2.- RECUBRIMIENTO

En la industria, se desechan piezas mecánicas por dos motivos fundamentales: El desgaste de piezas y la rotura como consecuencia de defectos de fabricación, diseño o sobreesfuerzo (los cuales son poco frecuentes). Durante mucho tiempo se consideró que una pieza tenía una vida útil, la cual al cumplirse daba lugar al reemplazo de la pieza. Hoy en día se introduce un nuevo concepto, debido a que hay infinidad de piezas sometidas a desgaste, que mediante el proceso de recubrimiento prolongan su vida útil.

El recubrimiento es un proceso en el cual se aplica un producto químico en estado líquido o en una formulación compuesta, sobre un sustrato mediante diferentes métodos como termorrociado, soldadura, etc., con el fin de mejorar la resistencia al desgaste o recuperar las dimensiones adecuada para la puesta en servicio de la pieza.

Las aleaciones existentes tienen, por lo general, diferentes funciones en la reconstrucción de la pieza. Algunas están diseñadas para reconstruir la pieza hasta

unas dimensiones determinadas, y otras para obtener una capa delgada antidesgaste que proteja la superficie de trabajo. Así, puede decirse que en general el proceso de recubrimiento y recuperación de piezas se utilizan básicamente en dos áreas que se detallan a continuación.

- **Reconstrucción de Piezas**

Se logra mediante la aplicación de capas de relleno y de recubrimiento antidesgaste. En ambos casos, las propiedades de la pieza reconstruida son generalmente superiores a las de la pieza original. Estas piezas se pueden reconstruir solo si se siguen los procedimientos adecuados.

- **Recubrimiento Antidesgaste de Piezas Metálicas Nuevas**

La capa de recubrimiento antidesgaste, se aplica a piezas nuevas o usadas, en aquellas zonas donde son más susceptibles de desgaste. La capa de recubrimiento de alta aleación ofrece una resistencia superior al desgaste en comparación con la resistencia del material base original. Esto aumenta la vida útil del componente con relación a una pieza que no ha sido recubierta. En algunos casos el recubrimiento puede aumentar el costo del equipo, pero esto se compensa empleando materiales base de menor costo.

1.3.- TERMORROCIADO

Los recubrimientos termorrociados son aplicados frecuentemente para obtener mayor resistencia principalmente frente al desgaste y la corrosión, tanto a temperatura ambiente como a temperaturas elevadas. De igual forma también se usa para restablecer las dimensiones de piezas desgastadas. En las técnicas de termorrociado se utiliza la energía química (combustión) o eléctrica (plasma o arco) para calentar y acelerar partículas (metal, cerámica, cermets, intermetálicos

y polímeros), con una pistola o antorcha a velocidades que oscilan entre 50-1000m/s[8] para proyectarlas contra la superficie recubierta.

Cuando las partículas impactan sobre la superficie del sustrato se produce una deformación significativa en ellas, debido a las altas velocidades y temperaturas con las que son expulsadas de la pistola. Mediante esta deformación se producen capas o placas delgadas (“splats”) que posteriormente se conforman y se adhieren a la superficie del sustrato a través de un enlace mecánico.

La pistola de Termorrociado genera el calor necesario usando:

- Gases combustibles
- Un Arco eléctrico.
- Un Plasma.

Mientras el material es calentado, este cambia a un estado pastoso o semifundido y es acelerado hacia la superficie usando gas de transporte. Las partículas chocan contra la superficie formando finas placas que se adhieren a las irregularidades de la superficie preparada y entre ellas mismas formando el recubrimiento. El enfriamiento de las placas finas ocurre a altas velocidades, para formar materiales cristalinos, uniformes y de grano pequeño. Los depósitos contienen niveles de porosidad, partículas fundidas, semifundidas o no fundidas e inclusiones de oxido (debido a la oxidación de la partícula). Las características del recubrimiento dependen del tipo de proceso de termorrociado usado, las condiciones de operación y del material a rociar.

1.3.1.-Características

En la figura se presenta la sección transversal, de una superficie recubierta con este método. Un aspecto crítico es la porosidad presente en el revestimiento, esta puede variar de un 20% hasta un mínimo de 1% el cual es muy difícil de alcanzar. Dependiendo de las condiciones también pueden aparecer las partículas no fundidas, que por alguna razón no llegaron a la temperatura de fusión y fueron incorporadas al recubrimiento, ésta generalmente interrumpe la continuidad del

mismo y disminuye su fuerza cohesiva. Cuando se rocían metales o aleaciones, parte de ellos se pueden oxidar y aparecen entonces inclusiones de óxidos en el recubrimiento. Esto no siempre es malo, inclusive, un alto porcentaje de óxidos en el recubrimiento puede mejorar la dureza y resistencia del mismo, a expensas en la cohesión o influencia del mismo.

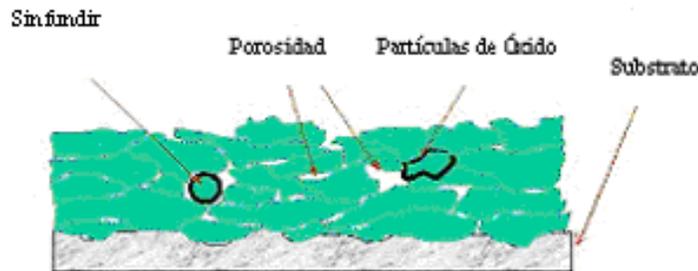


Figura I.1 Sección transversal de una superficie recubierta por Termorrociado

1.3.2.-Material de Alimentación

El material de alimentación puede ser cualquier sustancia que pueda ser fundida incluyendo metales, compuestos metálicos, cermets, óxidos, vidrios y polímeros. El Material se puede rociar en forma de: Polvos, alambres o barras.

1.3.3.-Sustratos

Este tipo de recubrimiento se puede aplicar en casi cualquier tipo de material: metales, cerámicas, vidrios, polímeros, materiales compuestos, etc. La característica esencial de un soporte es que debe presentar cierta rugosidad, de forma tal que el recubrimiento pueda adherirse adecuadamente. El método de preparación de la superficie debe seguir los siguientes pasos para garantizar una buena adhesión:

- Limpiar la superficie ya sea con ultrasonido, utilizando solventes, o cualquier otro método, de forma tal que se asegure que la misma esté libre de grasa, óxidos o cualquier otra partícula extraña a la misma.

- Creación de la rugosidad, esto se hace como se dijo anteriormente para aumentar la adherencia de la capa, ya que sirve de anclaje mecánico y aumenta la superficie de contacto. esto generalmente se hace por granallado, proceso en el cual se proyectan partículas de un material abrasivo sobre la superficie a recubrir.
- En metales, a veces se realizan procesos de pasivación en los que se crea una capa de óxido natural sobre la superficie para mejorar la adherencia.
- Otros materiales como compuestos y polímeros pueden necesitar preparaciones especiales.

1.3.4.- Propiedades del proceso de termorrociado

Las propiedades del recubrimiento, dependen del material de alimentación, del proceso de termorrociado, de los parámetros de aplicación y del postratamiento térmico del recubrimiento.

▪ Dureza, densidad y Porosidad:

Los recubrimientos por termorrociado, suelen utilizarse por su alto grado de dureza y resistencia a la erosión, esto los hace especialmente valiosos en aplicaciones del alto desgaste.

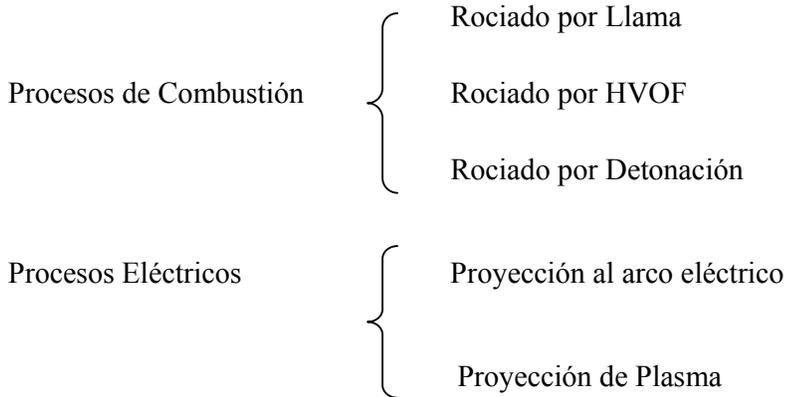
En general, a mayor velocidad de partícula más duro y denso será el recubrimiento. La velocidad de partícula para los distintos procesos, en orden decreciente es: detonación, ion, high-velocity oxygen flame (HVOF), arco por plasma, arco por alambre y rociado por llama. La densidad también depende de la temperatura de la partícula y del tipo de gas de transporte. La porosidad también depende del tipo de proceso de termorrociado de los parámetros utilizados y del material utilizado.

▪ Adhesión:

Este tipo de recubrimientos puede tener muy alta adhesión, si se utiliza una técnica de deposición de alta velocidad de partículas.

1.3.5.- Tipos de Termorrociado

Los procesos de Termorrociado pueden ser de dos tipos, los cuales a su vez tienen otras subdivisiones:



1.3.5.1-Procesos de Combustión

1.3.5.1.1-Proceso por Llama

Es la forma más antigua de termorrociado, puede ser usada con una gran variedad de materiales de alimentación, incluyendo alambres de metal, barras de cerámica, polvos metálicos y no metálicos. El material es alimentado continuamente hacia la pistola donde es fundido en una llama de combustible gaseoso y propulsado hacia el sustrato en una corriente de gas atomizante. Algunos gases usados como combustible son: Acetileno y Propano. El aire es generalmente utilizado como gas transporte. Las llamas de oxiacetileno son usadas extensivamente para Termorrociado con barras debido al grado de control y las altas temperaturas ofrecidas por estos gases. Además esta llama puede ser ajustada para ser oxidante, neutra o reductora.

La instalación de un sistema de rociado por llama es relativamente económica y móvil. Para una instalación simple todo lo que se requiere es una antorcha de rociado por llama y una fuente de oxígeno y gas combustible.

Debido a sus bajas velocidades aproximadamente de 300fps de proyección de partículas comparado con otros procesos de termorrociado, este tipo de recubrimientos generalmente es de menor calidad, tienen alta porosidad y bajas fuerzas cohesivas y adhesivas como consecuencia de óxidos atrapados entre las lamelas [23].

Una de las aplicaciones más comunes para este tipo de recubrimientos es en protección contra la corrosión.

1.3.5.1.2- Rociado por HVOF (High Velocity Oxygen Fuel)

Es uno de los métodos más nuevos de termorrociado, utiliza oxígeno y un gas como combustible a altas presiones. Algunos gases combustible típicos son propano, propileno e hidrógeno. La mezcla de gases es acelerada a velocidades supersónicas y el material de alimentación en forma de polvo es inyectado dentro de la llama. El proceso maximiza la energía cinética para producir recubrimientos que son realmente densos, con baja porosidad y alta fuerza de enlace.

Este proceso se encuentra íntimamente relacionado al rociado por llama, pero una diferencia esencial entre ellos es que en el rociado por llama el proceso de combustión se realiza en el aire (ambiente), mientras que en el HVOF la combustión se realiza en una pequeña cámara. Debido a las altas presiones creadas en la cámara de combustión, los gases salen a velocidades supersónicas, y aceleran las partículas fundidas. Estas, aunque no alcanzan las velocidades de los gases, alcanzan altas velocidades con las que chocan en la superficie obteniendo un recubrimiento de alta calidad. Este tipo de rociado se usa extensivamente para aplicaciones que requieran alta resistencia a la abrasión [23].

Tabla I.1. Beneficios del proceso HVOF

CARACTERÍSTICAS	CAUSA
Alta densidad.	Alta energía de impacto.
Mayor resistencia a la corrosión.	Menor porosidad.
Mayor resistencia al desgaste.	Recubrimientos más duros.
Mayor adhesión y resistencia cohesiva.	Mejor enlace entre las partículas.
Menor contenido de óxido.	Menor tiempo de exposición al aire.
Menor contenido de partículas no fundidas.	Mejor calentamiento de las partículas.
Mayor estabilidad química de los polvos y fases.	Menor tiempo a la temperatura.
Recubrimientos más gruesos.	Menos esfuerzos residuales.
Superficies con menor rugosidad.	Mayor energía de impacto.

1.3.5.1.3- Rociado por Detonación

Este proceso es diferente del rociado por llama, en el se usa un proceso de combustión continuo con una serie de explosiones intermitentes que funden y proyectan las partículas hacia la superficie. En la cámara hay una mezcla de oxígeno, acetileno y el material en polvo del cual se hará el recubrimiento, y las detonaciones se hacen varias veces por segundo. El material es depositado a muy altas velocidades para producir recubrimientos muy densos y con altas durezas. El procedimiento se repite hasta obtener el espesor de recubrimiento deseado. El procedimiento alcanza niveles de ruido que exceden los 150 dB y por lo tanto debe realizarse en habitaciones a prueba de sonido y de explosiones. Los recubrimientos obtenidos con este método son de excelente calidad, pero con un costo muy alto. Algunas aplicaciones típicas son: recubrimientos de alta resistencia a la abrasión y de altas temperaturas [3].

1.3 5.2- Procesos Eléctricos

1.3.5.2.1- Proyección al arco eléctrico

Es generalmente el método de termorociado más económico. En este proceso se usa una corriente eléctrica para generar la energía térmica necesaria para fundir los materiales. Este proceso utiliza dos barras de metal como alimentación. Estos dos metales actúan como electrodos que son continuamente consumidos mientras se funden debido al arco eléctrico presente entre ellos. Para que esto suceda, las dos barras deben estar cargadas eléctricamente, una negativa y otra positiva y dispuestas de tal forma que el ángulo entre ellas se reduzca gradualmente. Una diferencia de potencial entre 15 y 50 voltios es aplicada y el calor que se genera funde las puntas de las barras y el gas de transporte proyecta las gotas hacia el sustrato. Este gas de transporte es generalmente aire comprimido, pero también se puede usar un gas inerte como Nitrógeno o Argón.

Tiene aplicaciones tan variadas como recubrimientos de grandes estructuras: puentes, postes de luz, etc., y de componentes electrónicos, etc.

1.3.5.2.2- Proyección en plasma

Este proceso utiliza un arco eléctrico DC para generar un flujo de plasma gaseoso con muy altas temperaturas que actúa como la fuente de calor para el rociado. El arco se forma entre dos electrodos no consumibles, el cátodo de tungsteno y el ánodo de cobre. La antorcha es alimentada con un flujo continuo de gas inerte el cual es ionizado por el arco DC y es comprimido y acelerado por la antorcha de forma tal que sale a grandes velocidades y altas temperaturas como un jet de plasma. El material de alimentación en forma de polvo es alimentado en este plasma donde es calentado y propulsado hacia la superficie a recubrir. Gracias a las altas temperaturas y altas energías térmicas del plasma jet, se pueden rociar materiales con alto punto de fusión tales como cerámicas y metales

refractarios. Este tipo de recubrimiento se usa ampliamente en partes de equipos como turbinas, en el área de compresores y cámaras de combustión

1.3.6.-Aplicaciones del proceso de termorrociado:

Mediante esta técnica se reconstruyen cilindros y camisas de compresores, vástagos de bombas y compresores rotativos y reciprocantes, cigüeñales de bombas, compresores y motores, y en general todo tipo de mecanismo que sufra un desgaste durante el servicio.

Entre otras aplicaciones del proceso de Termorrociado se puede mencionar:

- Reconstrucciones de componentes de máquinas.
- Revestimientos duros antidesgaste.
- Revestimientos anticorrosivos.
- Mejoramiento de superficies de trabajo
- En piezas que necesiten alta resistencia al desgaste y a la corrosión de la superficie.
- Restauración dimensional de piezas desgastadas (bloques de motores, ejes, brocas de perforación, etc.).
- En la industria química, de plástico, biomedicina e implementos para la agricultura.

1.4.- ENSAYO DE INDENTACIÓN

El ensayo de indentación, consiste en presionar un indentor sobre la superficie dejando una impresión sobre el material. Si el material es duro el tamaño de la huella será relativamente pequeño mientras que, si el material es blando, la huella será grande o profunda. Dicha indentación se realiza bajo ciertas

condiciones como son perpendicularidad entre el eje de aplicación de la carga y la superficie de respuesta, tiempo de aplicación, estado superficial entre otras.

Dependiendo del área de contacto inducida entre el indentor y las muestras del material, los ensayos de indentación se sitúan en los rangos nano-, micro- o macroindentación. De esta forma, en los ensayos de nanoindentación se utiliza una carga menor a 1N, mientras que en el de microindentación es de 1-500N[17].

Los ensayos Rockwell pertenecen a la escala macro, mientras que los ensayos Knoop se emplean a escala micro. El ensayo Vickers y Brinell pueden usarse tanto en micro como macro.

Gran cantidad de propiedades pueden determinarse a partir de los resultados suministrados por un ensayo de indentación. Seguidamente se ofrece una lista de estas propiedades: Módulo de elasticidad, esfuerzo de fluencia, esfuerzo real a la carga máxima. Algunas de estas propiedades tienen relaciones numéricas con la dureza, y otras, como la tenacidad a, están basadas en la observación de las grietas que envuelven a la huella de indentación.

1.4.1.-Principios del método

La base de los ensayos de indentación estáticos es que se fuerza un indentor a través de la superficie del material que se desea ensayar. Cuando la fuerza se aplica sobre la probeta mediante contacto con el indentor, el material sufrirá deformación plástica a partir de una carga crítica. Después de retirar la fuerza aplicada, se espera que exista una cierta cantidad de recuperación elástica en la dirección opuesta al flujo inicial. Dado que la recuperación elástica no es total, se encuentran tensiones residuales debajo de la huella.

1.4.2.- Tipos de Ensayos de Indentación.

1.4.2.1.- Ensayo Brinell.

El objeto penetrante es una esfera de acero templado, de carburo de tungsteno de diámetro D . La prueba consiste en presionar el material con la esfera bajo la acción de una carga P , sobre la superficie (Figura II.2). La carga se aplicará durante unos cuantos segundos. Después de retirar el indentor, se mide el diámetro de la huella con la ayuda de un microscopio.

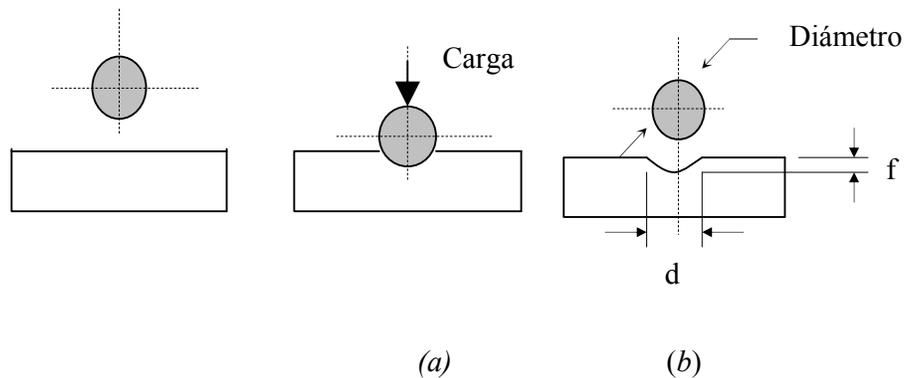


Figura I.2 Esquema de la indentación Brinell. (a) Etapa de aplicación de carga, (b) Huella residual.

El área superficial S de la hendidura en forma de casquete esférico, que queda por la penetración del indentor, está en función del diámetro inicial D de la esfera y del diámetro d de huella residual. La superficie se calcula según la siguiente relación[21]:

$$S = \pi Df \quad (1.6)$$

$$\text{con } f = \frac{1}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) \quad (1.7)$$

Reemplazando se tiene:

$$S = \frac{\pi D}{2} \left(D - \sqrt{D^2 - d^2} \right) \quad (1.8)$$

La dureza se halla, reemplazando lo anterior en la relación (4.1), obteniéndose así:

$$HB = \frac{P}{S} = \frac{2P}{\pi D (D - \sqrt{D^2 - d^2})} \quad (1.9)$$

1.4.2.2.- Ensayo Rockwell.

El indenteor tiene forma de cono recto con un ángulo de 120° en el vértice. La profundidad de la huella se determina según la diferencia entre las posiciones de la punta del indenteor, desde la precarga hasta llegar a la carga máxima. Figura I.3 esquematiza el principio de la prueba.

La prueba Rockwell C consiste en aplicar una carga de 100 N, de modo que el cono penetra una profundidad h_1 . Luego se le aplicará una fuerza de 100 N + P, con P = 1400 N, con una duración de 3 a 8 segundos. El cono se hunde hasta una profundidad h_2 . Al retirarse la carga, debido a la recuperación elástica del material, el cono queda a una profundidad h_3 menor que h_2 . La profundidad remanente ($h_3 - h_1$) permite calcular la dureza Rockwell C (HRC) según la fórmula siguiente[21]:

$$HRC = (100 - (h_3 - h_1)) \cdot 500 \quad (1.10)$$

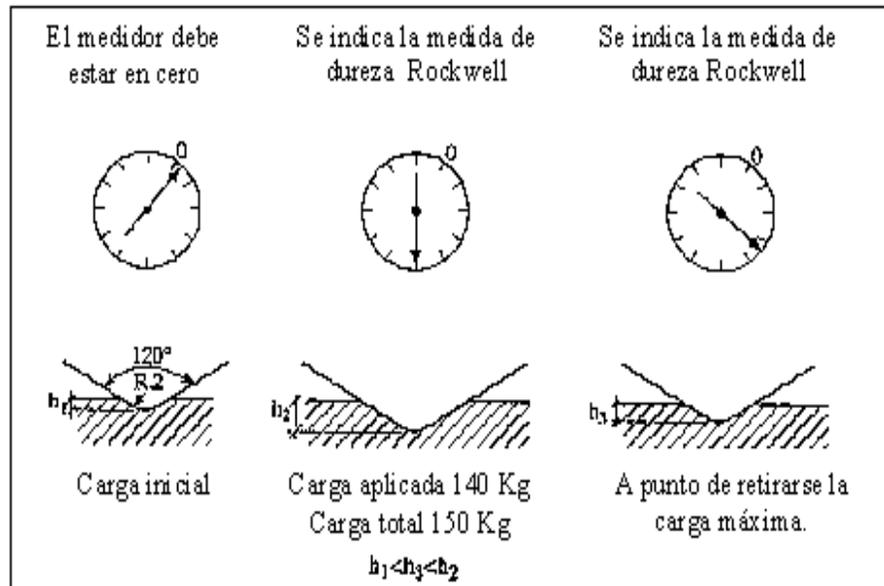


Figura I.3 Esquema de la indentación Rockwell C[21].

1.4.2.3.- Ensayo Vickers.

En la prueba Vickers, el objeto penetrante es una pirámide base cuadrada de diamante en forma de pirámide de base cuadrada. El ángulo entre las caras triangulares opuestas es de 136° y entre las líneas opuestas es de 148° (Figura I.4). La relación de los ángulos medidos entre los lados y las caras es la siguiente[21]:

$$\frac{AM}{BM} = \frac{\text{tg}74^\circ}{\text{tg}68^\circ} = \sqrt{2} \quad (1.11)$$

Luego de haber penetrado la superficie del material con el indente, la huella residual queda en forma de cuadrado (Figura II.4). El valor de dureza se calcula a partir de la relación entre la carga y la superficie real de contacto. El área real de contacto de la pirámide con el material (S) representa cuatro veces el área del triángulo coloreada en gris de la Figura II.4. Así, S es equivalente a:

$$S = 4 \frac{\overline{AC} \cdot \overline{VB}}{2} = \frac{4 \cdot a \cdot \overline{VB}}{2} \quad (1.12)$$

$$\text{Con } \left\{ \begin{array}{l} \frac{a}{2} = \overline{VB} \cdot \sin 68^\circ \Rightarrow \overline{VB} = \frac{a}{2 \cdot \sin 68^\circ} \\ a^2 + a^2 = d^2 \Rightarrow 2 \cdot a^2 = d^2 \Rightarrow a = \frac{\sqrt{2}}{2} d \end{array} \right\} \Rightarrow \overline{VB} = \frac{\sqrt{2} \cdot d}{4 \cdot \sin 68^\circ} \quad (1.13)$$

Así, la superficie S se puede expresar únicamente en función de la huella diagonal d según la relación:

$$S = \frac{4 \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} d \cdot \frac{\sqrt{2}}{2} d}{4 \sin 68^\circ} = \frac{d^2}{2 \sin 68^\circ} \quad (1.14)$$

Sustituyendo (1.14) en $HV = \frac{P}{S}$, se obtiene la expresión general de la dureza Vickers:

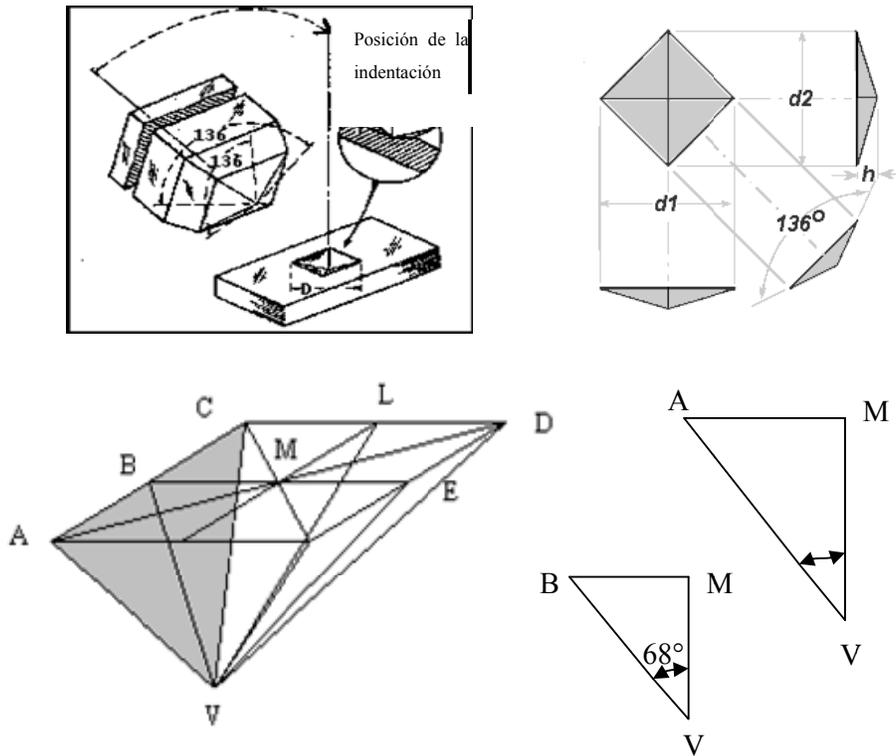


Figura I.4 Esquema de la indentación Vickers.

$$HV = \frac{1854,4 \cdot P}{d^2} \quad (1.15)$$

HV se expresa en Kgf/mm^2 si la carga P se da en gf y la diagonal de la huella d en μm . A veces, la cantidad de dureza se expresa en GPa . En este caso, la carga P se expresa en Newton (N) en la relación (1.15).

En la práctica, el valor de la diagonal se obtiene a partir del promedio de las medidas de las dos diagonales.

Un parámetro importante que se observa con frecuencia en el estudio de la indentación Vickers es la relación entre la diagonal y la profundidad de la huella o penetración h (distancia \overline{MV} en la Figura I.4). Desde un punto de vista teórico, este valor se obtiene de la siguiente manera:

$$\cos 68^\circ = \frac{\overline{MV}}{\overline{VB}} = \frac{h}{\frac{\sqrt{2} \cdot d}{4 \cdot \sin 68^\circ}} \Rightarrow h = \frac{\sqrt{2}}{4} \cdot d \cdot \cot 68^\circ = \frac{d}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot \tan 68^\circ} \approx \frac{d}{7} \quad (1.16)$$

1.4.2.4.- Ensayo Knoop.

El indentor Knoop es una pirámide cuya base es un rombo. El menor ángulo entre líneas opuestas es de 130° y el mayor ángulo es de $172^\circ 30'$. La huella que deja la indentación tiene la forma de un rombo alargado (Figura I.5).

El valor de dureza se calcula a partir de la relación entre la carga y la proyección de la huella en la superficie de contacto. El área de contacto del material proyectada sobre la superficie (S_p) representa cuatro veces la proyección del área del triángulo en gris que se ve en la Figura I.5. Así, S_p es igual a:

$$S_p = 4 \cdot \frac{1}{2} \cdot \overline{AM} \cdot \overline{BM} = 2 \cdot \frac{L}{2} \cdot \frac{w}{2} = \frac{L \cdot w}{2} \quad (1.17)$$

$$\text{con } \left\{ \begin{array}{l} \frac{L}{2} = h \cdot \tan(86^\circ 15') \Rightarrow h = \frac{L}{2 \cdot \tan(86^\circ 15')} \\ \frac{w}{2} = h \cdot \tan(65^\circ) \Rightarrow h = \frac{w}{2 \cdot \tan(65^\circ)} \end{array} \right\} \Rightarrow w = \frac{\tan(65^\circ)}{\tan(86^\circ 15')} \cdot L \Rightarrow [L = 7,11 \cdot w]$$

De esta forma, la superficie S_P se puede expresar únicamente en función de la diagonal mayor L , según la relación:

$$S_P = \frac{L}{2} \cdot \frac{\tan(65^\circ)}{\tan(86^\circ 15')} \cdot L = 0,07028 \cdot L^2 \quad (1.18)$$

Sustituyendo (1.18) en $HV = \frac{P}{S}$, se obtiene la expresión general de la dureza

Knoop:

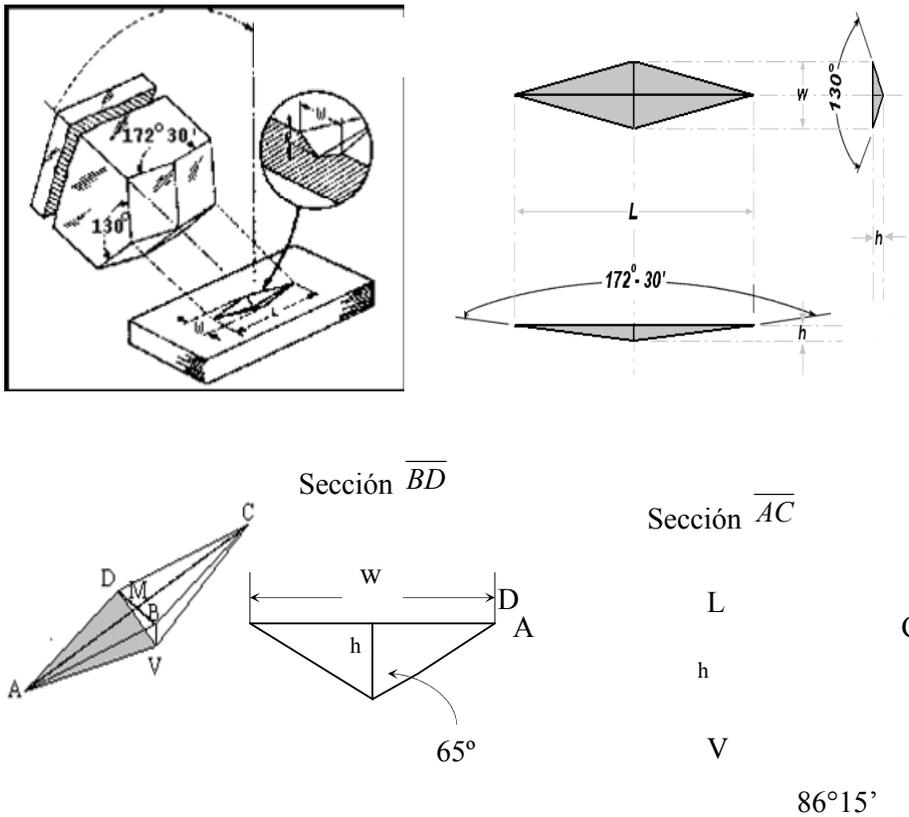


Figura I.5 Esquema del indenteor Knoop.

$$HK = \frac{14,229 \cdot P}{L^2} \quad (1.19)$$

En la práctica, es suficiente medir la longitud de la diagonal mayor (L) de la huella impresa por la penetración para obtener el valor de dureza.

1.5.- ENSAYO DE TRACCION UNIAXIAL Y CURVA DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN

El ensayo de tracción uniaxial se utiliza para evaluar varias propiedades mecánicas de los materiales que son importantes en el diseño, dentro de las cuales se destaca la resistencia a la tracción, esfuerzo de fluencia, modulo elasticidad, endurecimiento por deformación, etc.

En este ensayo la muestra se deforma usualmente hasta la fractura incrementando gradualmente una tensión que se aplica uniaxialmente a lo largo del eje longitudinal de la muestra. Las muestras normalmente tienen sección transversal circular, aunque también se usan probetas planas. Durante la tensión, la deformación se concentra en la región central más estrecha, la cual tiene una sección transversal uniforme a lo largo de su longitud. La muestra se sostiene por sus extremos en la máquina por medio de soportes o mordazas que a su vez someten la muestra a tensión a una velocidad constante. La máquina al mismo tiempo mide la carga aplicada instantáneamente y la elongación resultante (en algunos casos usando un extensómetro). Un ensayo de tensión normalmente dura pocos minutos y es un ensayo destructivo, ya que la muestra es deformada permanentemente y usualmente fracturada.

El ensayo se realiza en una Máquina Universal y la operación consiste en someter una probeta (Figura I.6) a una carga uniaxial gradualmente creciente hasta que ocurra la falla.

Las probetas para ensayos de tracción uniaxial se fabrican en una variedad de formas. La sección transversal de la probeta puede ser circular, cuadrada o rectangular. Para la mayoría de los casos, en metales, se utiliza comúnmente una probeta de sección circular. Para láminas y placas usualmente se emplea una probeta plana.

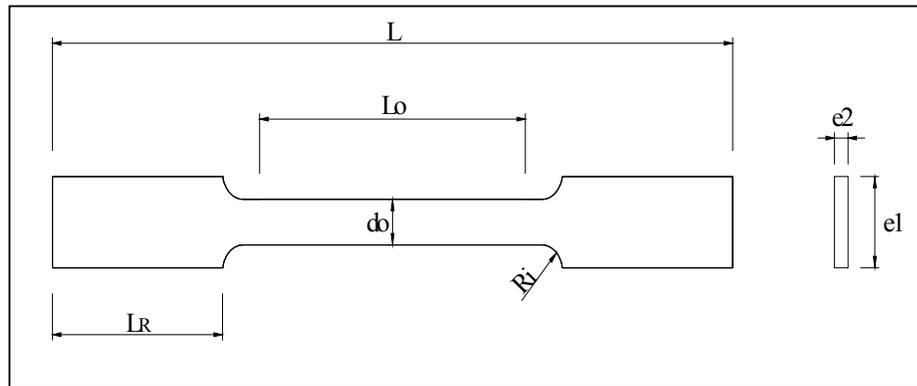


Figura I.6 Probeta plana para ensayo de tracción

La transición del extremo a la sección reducida debe hacerse por medio de un bisel adecuado para reducir la concentración de esfuerzos causados por el cambio brusco de sección.

Curva Esfuerzo-Deformación

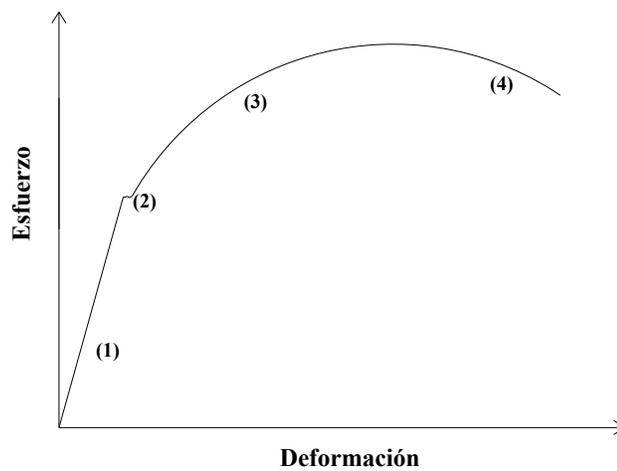


Figura I.7 Curva Esfuerzo vs Deformación.

En el ensayo se mide la deformación (alargamiento) de la probeta entre dos puntos fijos de la misma a medida que se incrementa la carga aplicada, y se representa gráficamente en función de la tensión (carga aplicada dividida por la sección de la probeta). En general, la curva tensión-deformación así obtenida presenta cuatro zonas diferenciadas:

1. Deformaciones elásticas: en esta zona las deformaciones se reparten a lo largo de la probeta, son de pequeña magnitud y, si se retirara la carga aplicada, la probeta recuperaría su forma inicial. El coeficiente de proporcionalidad entre el esfuerzo y la deformación se denomina módulo de elasticidad o de Young y es característico del material. Así, todos los aceros tienen el mismo módulo de elasticidad aunque sus resistencias puedan ser muy diferentes. La tensión más elevada que se alcanza en esta región se denomina límite de fluencia y es el que marca la aparición de este fenómeno. Pueden existir dos zonas de deformación elástica, la primera recta y la segunda curva, siendo el límite de proporcionalidad el valor de la tensión que marca la transición entre ambas. Generalmente, este último valor carece de interés práctico y se define entonces un límite elástico (convencional o práctico) como aquél para el que se produce un alargamiento prefijado de antemano (0,2%, 0,1%, etc.). Se obtiene trazando una recta paralela al tramo proporcional (recto) con una deformación inicial igual a la convencional.

2. Fluencia o cedencia. Es la deformación brusca de la probeta sin incremento de la carga aplicada. El fenómeno de fluencia se da cuando las impurezas o los elementos de aleación bloquean las dislocaciones de la red cristalina impidiendo su deslizamiento, mecanismo mediante el cual el material se deforma plásticamente. Alcanzado el límite de fluencia se logra liberar las dislocaciones produciéndose la deformación bruscamente.

3. Deformaciones plásticas: si se retira la carga aplicada en dicha zona, la probeta recupera sólo parcialmente su forma quedando deformada permanentemente. Las deformaciones en esta región son mayores que en la zona elástica.

4. Estricción: Llegado un punto del ensayo, las deformaciones se concentran en la parte central de la probeta apreciándose una acusada reducción de la sección de la probeta, momento a partir del cual las deformaciones continuarán acumulándose hasta la rotura de la probeta por ese zona. La estricción es la responsable del descenso de la curva esfuerzo-deformación; realmente las tensiones no disminuyen hasta la rotura, sucede que lo que se representa es el cociente de la fuerza aplicada (creciente) entre la sección inicial y cuando se produce la estricción la sección disminuye, efecto que no se tiene en cuenta en la representación gráfica. Los materiales frágiles no sufren estricción ni deformaciones plásticas significativas, rompiéndose la probeta de forma brusca. Terminado el ensayo se determina la carga de rotura, carga última o resistencia a la tracción: la máxima resistida por la probeta dividida por su sección inicial, el alargamiento en (%) y la estricción en la zona de la rotura.

Esfuerzo real - deformación Real

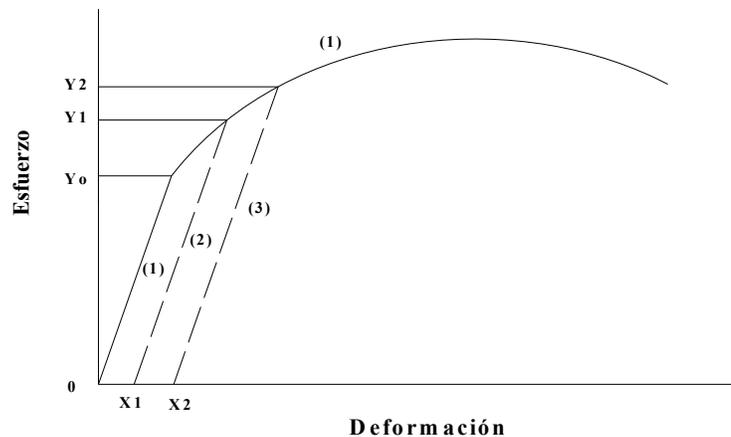


Figura. I.8 Endurecimiento de Trabajo[19].

Cuando los metales y las aleaciones estructurales se someten a esfuerzos superiores a sus límites elásticos, estos límites se elevan y se consume la ductilidad. Este proceso se ilustra esquemáticamente en la figura I.8. La línea continua (1) representa una curva ordinaria de esfuerzo - deformación, correspondiente a un material metálico ficticio. Si se elimina la carga de una muestra en tensión de este material, sujeto a esfuerzo Y_1 , la deformación ejercida en la barra se relajará hasta X_1 . Aplicando de nuevo la carga a la misma muestra, se tendrá una nueva curva de esfuerzo - deformación, indicada por la línea punteada (2), que encuentra a (1), la línea continua, a un esfuerzo Y_1 . Al quitar la carga en Y_2 , se permite la relajación de la deformación a X_2 . Si se vuelve a aplicar la carga, se genera por tercera vez una curva de esfuerzo - deformación, que principia en X_2 y se une con (1), al esfuerzo Y_2 . En los dos ciclos de carga, puede observarse que el límite elástico se ha aumentado para cada uno de ellos, es decir, de Y_0 a Y_1 y de Y_1 a Y_2 . El primer ciclo consumió también una ductilidad equivalente a la deformación OX_1 y el segundo otra equivalente a X_1X_2 . El aumento en el límite elástico se conoce como endurecimiento por trabajo en frío. El consumo de ductilidad está siempre relacionado con el endurecimiento de trabajo. Este endurecimiento sigue aumentando hasta el punto de ruptura; pero las gráficas ordinarias de esfuerzo y deformación de materiales dúctiles no presentan esta tendencia, sobre todo por encima de la carga máxima. Dicho inconveniente proviene del hecho de que, en las determinaciones ordinarias de esfuerzo y deformación, el esfuerzo (llamado a veces esfuerzo aparente o ingenieril) se calcula dividiendo la carga P entre el área inicial de la sección transversal (A_0), mientras que la deformación ingenieril “ e ” se determina a partir del alargamiento total “ ΔL ” entre las marcas de calibración, al dividir “ ΔL ” entre la longitud calibrada L_0 .

$$S = \frac{P}{A_0} \quad (1.20)$$

$$e = \frac{\Delta L}{L_0} = \frac{L - L_0}{L_0} = \frac{L}{L_0} - 1 \quad (1.21)$$

Si se quiere calcular un valor más exacto del esfuerzo, la carga P debe ser dividida entre el área instantánea A_i , el cual se denomina esfuerzo real.

$$\sigma = \frac{P}{A_i} \quad (1.22)$$

Si se cumple la conservación de volumen, $V_o = V_i$ [19]

$$A_o * L_o = A_i * L_i$$

Despejando A_o se tiene

$$A_i = \frac{A_o * L_o}{L_i} \quad (1.23)$$

Sustituyendo (1.23) en (1.22)

$$\sigma = \frac{P * L_i}{A_o * L_o} = S * \frac{L_i}{L_o} \quad (1.24)$$

Despejando de (1.21) $\frac{L}{L_o}$ y sustituyendo en (1.24)

$$\sigma = S * (1 + e) \quad (1.25)$$

La deformación real se define como dL/L , en donde dL es el cambio incremental de longitud y L la longitud real de escala en el momento en que se determina la variación. La deformación ingenieril (o aparente) se determina con un criterio análogo al utilizado para calcular el esfuerzo ingenieril.

$$L_1, L_0$$

$$\varepsilon = \int \frac{dL}{L} = Ln \frac{L_1}{L_0} \quad (1.26)$$

Puesto que la densidad y, por tanto, el volumen del material no cambia por la acción de la deformación,

$$\varepsilon = Ln \frac{A_0}{A_1} \quad (1.27)$$

es más, puesto que

$$e = \frac{L_1 - L_0}{L_0} = \frac{L_1}{L_0} - 1$$

$$e + 1 = \frac{L_1}{L_0}$$

y

(1.28)

La relación entre la curva de esfuerzo - deformación ingenieriles (S, e) y la curva de esfuerzo - deformación reales (σ, ϵ) se ilustra en forma esquemática en la siguientes gráfica:

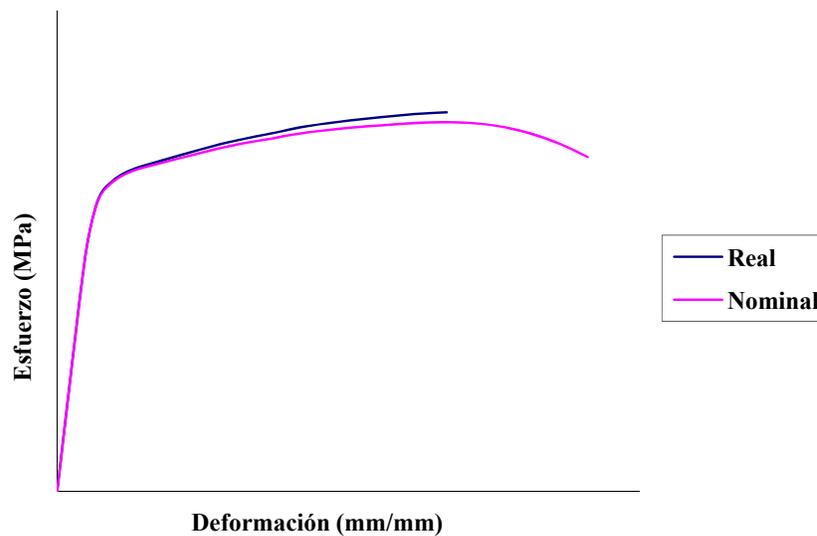


Figura I.9 Esfuerzo y deformación reales, comparados con la curva normal de esfuerzo vs deformación

La diferencia entre la deformación real y la ingenieril puede apreciarse claramente después de una deformación de aproximadamente el diez por ciento. Una deformación real del 70 por ciento es casi equivalente al 100 por ciento de la deformación ingenieril.

Se pueden producir desviaciones de la relación esfuerzo real - deformación real, cuando los datos se obtienen de una muestra ordinaria de tensión, más allá del punto en el que se aprecia la formación de un cuello. Estas desviaciones resultan del hecho de que los cambios en la longitud y el área de la sección transversal no son uniformes a todo lo largo de la muestra y, en consecuencia, los esfuerzos reales y las deformaciones reales tampoco son uniformes. Es más, una vez que la muestra comienza a adelgazarse y adquirir forma de cuello, los esfuerzos ya no pueden tratarse como si fueran esfuerzos axiales. Las constricciones en la región adelgazada producen un patrón de esfuerzos mucho más complicado que el de esfuerzos axiales, y el esfuerzo real que existe incluso es mayor que el calculado. Por tanto, los resultados de este experimento son sólo aproximados; pero aun así, los resultados deben demostrar que el metal se hace más fuerte, hasta el punto de ruptura.

Si la gráfica del esfuerzo real en función de la deformación real, correspondiente al intervalo plástico, se hace en escala log - log, se aproxima una línea recta. En efecto,

$$\text{Log } \sigma = \log k + m * \log \varepsilon \quad (1.29)$$

$$\sigma = k * \varepsilon^m \quad (1.30)$$

en donde m y k son constantes. Para evaluar las constantes, tome primero $\varepsilon = 1$, para la que $\log \varepsilon = 0$ y $\log \sigma_{\varepsilon=1} = \log k$, o $\sigma_{\varepsilon=1} = k$. Por tanto, k es el esfuerzo real en una deformación real $\varepsilon = 1$. Si un valor de ε y otro correspondiente de σ se substituyen en la ecuación arriba mostrada por encima del valor de m , éste se puede calcular sin dificultad. El valor de m se conoce como coeficiente de endurecimiento por deformación de trabajo. Cuando el material tiene un valor grande de m , significa que se endurece más, debido a una cantidad dada de trabajo en frío o deformación plástica, que cuando el valor de m es pequeño.

En el rango elástico $\sigma = S$ y $\varepsilon = e$, y, por tanto, puesto que $S = Ee$, entonces $\sigma = E\varepsilon$. La representación gráfica del esfuerzo real en función de la deformación real, en el rango elástico, hecha en coordenadas log-log, da por resultado una línea recta, con una pendiente de 45 grados, es decir,

$$\text{Log } \sigma = \log E + \log \varepsilon \quad (1.31)$$

y el extrapolar a $\log \varepsilon = 0$ y $\varepsilon = 1$, $\log \sigma_{\varepsilon=1} = \log E$ o bien, $\sigma_{\varepsilon=1} = E$. Si la porción elástica de los datos se representa gráficamente y las líneas de 45° se extrapolan $\varepsilon = 1$ de cada uno de los puntos de la gráfica, se encontrará que la extrapolación media se produce en el valor de E del metal.

La elongación porcentual describe la deformación plástica permanente antes de la falla(es decir, no se incluye la deformación elástica que desaparece después de la fractura[1]):

$$\text{Elongación} = \frac{L_f - L_o}{L_o} * (100) \quad (1.32)$$

donde L_o es la longitud calibrada original y L_f es la distancia entre las marcas de calibración al ocurrir la fractura.

La reducción porcentual de área mide el valor de la estricción que se presenta y se define como sigue:

$$R_A = \frac{A_o - A_f}{A_o} * (100) \quad (1.33)$$

Donde A_o es el área original de la sección transversal y A_f es el área final en la sección de la fractura.

Los materiales que fallan en tracción uniaxial a valores relativamente bajos de deformación unitaria se clasifican como materiales frágiles. En este ensayo las propiedades usualmente determinadas son: La resistencia a la fluencia (punto de fluencia), la resistencia a la tracción, la ductilidad (el alargamiento y la reducción de área), el módulo de elasticidad y el tipo de fractura.

Los ingenieros normalmente no utilizan cálculos basados en esfuerzo real, en su lugar se utiliza el esfuerzo de fluencia convencional al 0,2% para diseños de estructura con los factores de seguridad apropiados. En investigación de materiales, algunas veces puede ser útil conocer la curva de esfuerzo deformación real.

1.6.- TRATAMIENTOS TÉRMICOS

El tratamiento térmico es la operación que consiste en el calentamiento y enfriamiento controlado de un metal en su estado sólido con la finalidad de cambiar sus propiedades físicas. La ejecución correcta de un tratamiento térmico permite reducir los esfuerzos internos, el tamaño del grano, incrementar la tenacidad o producir una superficie dura con un interior dúctil. Todo esto depende del tipo de tratamiento, esto no quiere decir que con un solo tratamiento se logra todo esto. Para realizar un tratamiento térmico es recomendable utilizar los diagramas de cambios de fases como el de hierro-carbono. En este tipo de diagramas se especifican las temperaturas en las que suceden los cambios de fase (cambios de estructura cristalina). La importancia de los tratamientos térmicos en el ámbito industrial, es debida a las constantes innovaciones que hacen necesaria la utilización de metales con mayores resistencias tanto al desgaste como a la tensión.

1.6.1.- Temple

Consiste en enfriar el metal desde la temperatura de austenización de manera brusca, para transformarlo en una estructura totalmente martensítica y así obtener un material más duro y frágil.

El enfriamiento desde la temperatura de austenización hasta una temperatura por debajo de la curva de transformación sin difusión (M_s) debe realizarse a una velocidad tal que la curva de enfriamiento en el diagrama T-I (figura 1.10) no corte las curvas de transformación a la fase de austenita más ferrita (A+F) o la de austenita más ferrita más carburo (A+F+C), es decir como la trayectoria 1 o 1'' en la figura 1.10. Si se realiza el enfriamiento como se observa en la curva 5 el producto será una estructura de perlita y ferrita con bajo grado de dureza. Lo cual se aleja del resultado que queremos obtener con un tratamiento de temple. De igual forma si la velocidad de enfriamiento corresponde a las de las curvas 2 y 3, la estructura resultante es probablemente una mezcla de martensita, perlita fina y una pequeña cantidad de ferrita. Recordemos que una estructura con máxima dureza corresponde a la estructura martensítica la cual se logra con la curva de enfriamiento 1 y 1'' [7].

Se define la velocidad crítica de temple, de acuerdo con lo expuesto en el párrafo anterior, como la velocidad de enfriamiento mínima para que la totalidad de la austenita formada en el calentamiento del acero, se transforme en martensita. Las velocidades críticas de temple varían, para los aceros al carbono, de 200° a 600° por segundo, según sea el porcentaje de carbono. Los elementos de aleación hacen, en general, disminuir la velocidad crítica de temple, pudiendo algunos aceros aleados templarse al aire, a velocidades inferiores a $50^\circ/s$ [7].

Debido a la importancia que tiene la rapidez de enfriamiento en este proceso, hay que tomar muy en cuenta la selección del medio de temple. Un medio de temple ideal es aquel que realice un enfriamiento bastante rápido al comienzo para evitar la transformación en la nariz en el diagrama T-I y luego una lenta rapidez de enfriamiento a fin de minimizar la distorsión. Desafortunadamente, no hay un medio de temple que muestre estas propiedades ideales. El agua y las soluciones acuosas de sales inorgánicas tienen alta rapidez de enfriamiento al inicio, pero esta rapidez persiste a bajas temperaturas, mientras que en los aceites para temple

el enfriamiento al inicio es más lento y la segunda etapa de enfriamiento (por debajo de M_s en la figura I.10) es más corta pero con una rapidez más lenta[7]. Los siguientes medios de temple industriales se enumeran en orden de disminución de la severidad del temple:

1. Solución acuosa del 10% de cloruro de sodio (Salmuera);
2. Agua del grifo;
3. Sales fundidas o líquidas;
4. Aceite soluble y soluciones acuosas;
5. Aceite
6. Aire.

Nota: La temperatura de austenización recomendada para aceros hipoeutectoides (%C menor a 0,77) es de 50°F por encima de la temperatura crítica superior[7].

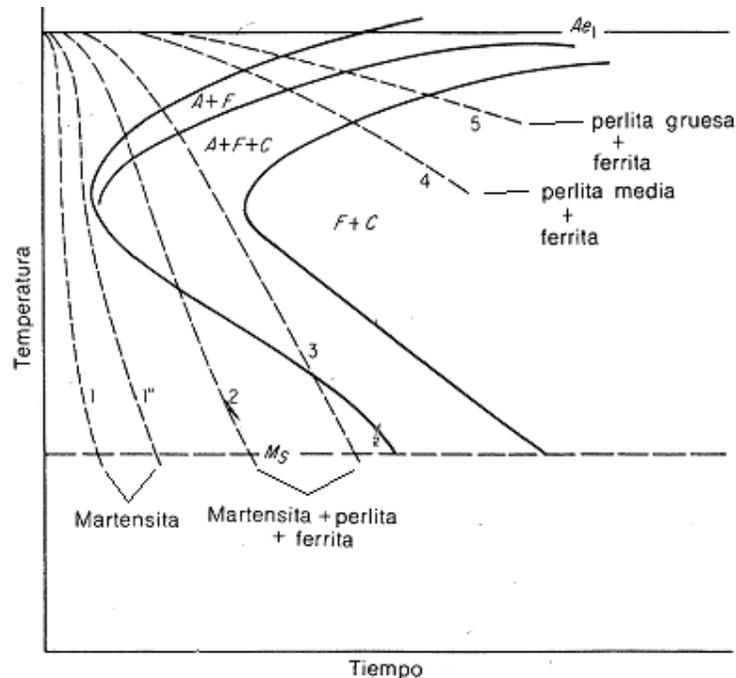


Figura I.10 Curvas de enfriamiento en el diagrama T-I de un acero al 0.45% de Carbono[7]

Los factores que influyen en la práctica del temple son:

- El tamaño de la pieza:

Uno de los factores que más influyen en las características finales que se obtienen al templar una pieza de acero, es su tamaño. En los perfiles delgados, tanto en el calentamiento como en el enfriamiento, se observará muy poca diferencia de temperatura entre la periferia y el interior de las piezas. Pero si se trata de piezas de gran espesor o gran diámetro, se comprende perfectamente que la temperatura en su interior sea inferior en el calentamiento y superior en el enfriamiento a la de su periferia, ya que el calor no se transmite directamente al interior, sino a través del espesor de la pieza, necesitando la transmisión de un tiempo determinado, que es el que produce el retraso con relación al proceso que se sigue.

Si se trata de calentamientos, el tamaño de las piezas no tiene otra influencia que aumentar la duración del proceso, pues, en general, no está limitada (hasta una temperatura determinada) la duración del calentamiento más que por razones económicas. Si la temperatura es muy elevada, ya hemos dicho que la duración del calentamiento aumenta el tamaño del grano.

Pero si se trata de un enfriamiento y siempre relativamente rápido como exige el temple, la influencia del espesor tiene mayores consecuencias, puesto que las velocidades que se obtienen en el interior de la pieza son a veces muy inferiores a las de la periferia. Y el resultado es que en piezas muy gruesas la velocidad de enfriamiento, a partir de un diámetro determinado, es inferior a la crítica y el núcleo de las piezas queda sin templar[7].

Sí esta barra se parte, se observan dos zonas perfectamente diferenciadas: una interior, de grano grueso, que es la zona que no ha adquirido temple por que la velocidad de enfriamiento ha sido inferior a la crítica, y otra zona periférica, de grano fino, que es la zona templada

La zona templada tiene aproximadamente la misma profundidad, sea cual sea el diámetro de la barra o espesor de la pieza, para, una misma composición del acero y condiciones de enfriamiento aumentando ligeramente a medida que el diámetro es más pequeño. Se comprende que cuando el radio de la pieza sea aproximadamente igual que la profundidad del temple, la totalidad de la masa del acero quedará templada.

- La composición química del acero:

El contenido de carbono del acero influye a la vez en la temperatura y en la velocidad crítica del temple. La temperatura de temple es tanto más baja cuanto más se aproxima el acero a la composición eutectoide.

La velocidad crítica de temple disminuye cuando el contenido de carbono aumenta. Por tanto, para las mismas condiciones de enfriamiento, el temple obtenido es más enérgico y la dureza en los aceros al carbono templados es mayor cuando más alto su porcentaje de carbono

Los elementos de aleación cambian la posición del punto eutectoide en el diagrama hierro-carbono ya conocido, y el acero aleado eutectoide no tiene ya el mismo porcentaje de carbono y, por tanto, se desplaza a derecha y a izquierda, ni la misma temperatura de transformación, y por tanto se desplaza hacia arriba o hacia abajo. En líneas generales, ocurren las siguientes variaciones:

1. - El aluminio, el berilio, el niobio, el tántalo, el titanio y el circonio forman carburos y aumentan, por tanto, el contenido de carbono del eutectoide desplazándolo hacia la derecha.
2. - El cobalto, el cobre y el silicio forman soluciones sólidas con el hierro, pero no dan ningún carburo. Como consecuencia, baja el contenido de carbono del eutectoide, desplazándose hacia la izquierda.

3. - El molibdeno, el cromo, el wolframio, el manganeso y el níquel disminuyen o aumentan el contenido de carbono del eutectoide, según la importancia de la aleación, pues de ella depende que formen soluciones sólidas con el hierro y el carbono o carburos metálicos.

- El tamaño del grano:

El tamaño del grano influye principalmente en la velocidad crítica de temple. A igualdad de composición las velocidades críticas de temple de los aceros de grano grueso son inferiores a las velocidades críticas de los aceros de grano fino.

- El medio de enfriamiento:

Al sumergir una barra de acero a alta temperatura en un líquido, tienen lugar las siguientes etapas:

1.^a Inmediatamente después de introducir la barra se forma una capa de vapor que envuelve el metal y que dificulta el enfriamiento, que por esta razón empieza siendo bastante lento influyen en esta etapa la temperatura inicial del baño, la temperatura de ebullición, la conductividad de su vapor y el grado de agitación del baño, que remueve el líquido en contacto con la barra.

2.^a Al descender la temperatura desaparece la envuelta de vapor, aunque el líquido en contacto con el metal sigue hirviendo y produciendo burbujas. El enfriamiento es rápido y se denomina enfriamiento por transporte de vapor. Influyen en esta etapa el calor de vaporización y la viscosidad del líquido.

3.^a Cuando la temperatura del metal desciende por debajo de la temperatura de ebullición del líquido de temple, el enfriamiento se hace por conducción y

convención; pero como entonces la diferencia de temperatura entre el metal y el medio es pequeña, el enfriamiento es lento, dependiendo de la conductividad térmica del líquido y de su grado de agitación.

De lo expuesto se deduce que las propiedades de los líquidos que más influyen en el enfriamiento de los aceros son: la temperatura inicial del baño, su temperatura de ebullición, su calor de vaporización, su calor específico, su conductividad calorífica, su viscosidad y, además, la masa del baño y su grado de agitación.

1.6.2.- Revenido

El acero en la condición martensítica es demasiado frágil para la mayoría de sus aplicaciones. La formación de esta estructura genera grandes tensiones residuales; por tanto, el temple casi siempre viene seguido por el revenido. La función del revenido es liberar los esfuerzos residuales y mejorar la ductilidad y tenacidad del acero. Este aumento en ductilidad generalmente se obtiene a costa de la dureza o resistencia a la abrasión.

El tratamiento de revenido consiste en calentar al acero después de normalizado o templado, a una temperatura inferior al punto crítico, seguido de un enfriamiento controlado.

Los fines que se consiguen con este tratamiento son los siguientes:

- Mejorar los efectos del temple, llevando al acero a un estado de mínima fragilidad.
- Disminuir las tensiones internas de transformación, que se originan en el temple.
- Modificar las características mecánicas en las piezas templadas.

- Aumentar las características de ductilidad; alargamiento estiración y las de tenacidad; resiliencia.

Los factores que influyen en el revenido son los siguientes: la temperatura de revenido sobre las características mecánicas, el tiempo de revenido (a partir de un cierto tiempo límite la variación es tan lenta que se hace antieconómica su prolongación, siendo preferible un ligero aumento de temperatura de revenido), la velocidad de enfriamiento (es prudente que el enfriamiento no se haga rápido) y las dimensiones de la pieza (la duración de un revenido es función fundamental del tamaño de la pieza recomendándose de 1 a 2 horas por cada 25mm de espesor o diámetro).

1.6.3.- Recocido

El término de recocido se refiere a un tratamiento térmico que consiste en mantener el material a una temperatura elevada durante un período de tiempo, y posteriormente enfriarlo lentamente. Este proceso se lleva a cabo para eliminar tensiones, incrementar la plasticidad, la ductilidad y la tenacidad y/o producir una microestructura específica. En otros términos, es un tratamiento que trata de llevar el material a un estado de equilibrio ideal.

Para los aceros la etapa de mantenimiento se realiza a una temperatura entre 10 y 45°C por encima de la línea A3[7] (figura 1.11). A esta temperatura y en condiciones de equilibrio (es decir, tras esperar el tiempo suficiente), prevalece la fase austenita. Posteriormente se deja que el material se enfríe lentamente, por ejemplo apagando el horno en que se ha realizado el calentamiento con el material en su interior, proceso que puede durar varias horas. La microestructura resultante de este proceso, como se haya visto la perlita gruesa, material que tiende a ser relativamente blando y dúctil. Es por lo tanto, un procedimiento que tiende a reducir la resistencia mecánica de los aceros y que, por consiguiente, facilita su mecanización (torneado, fresado, etc.).

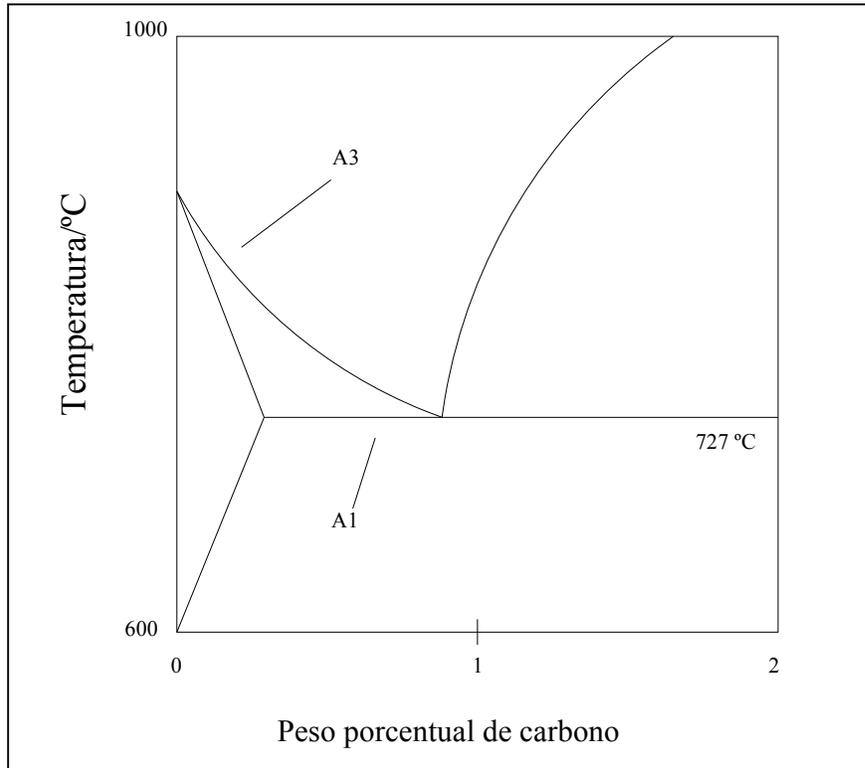


Figura I.11 Región del diagrama de fases hierro-carbono próximo al eutéctico, donde se indican las temperaturas de tratamiento térmico del acero[7].

Características generales del recocido.

- Se emplea para ablandar aceros.
- Se obtienen aceros más mecanizables.
- Evita la acritud del material.
- La temperatura de calentamiento está entre 600 y 700 °C.
- El enfriamiento es lento.

CAPÍTULO II: METODOLOGÍA EXPERIMENTAL

2.1.-MATERIAL BASE

Los materiales utilizados para la fabricación de las probetas fueron los siguientes: cobre C10100 recocido, acero AISI 4140 bonificado o (Q&T), y aluminio 6063-T5. Los materiales fueron recibidos de la siguiente forma:

- Cobre: Pletina de (6x20x1000) mm.
- Aluminio: Pletina de (6x20x1000) mm.
- Acero: Barra cilíndrica de 100mm de diámetro y 250mm de largo.

Las composiciones químicas de los materiales son:

- Cobre C10100 (Recocido)

El código UNS se compone de cinco dígitos después de la letra “C” (Cxxxxx). Los tres primeros dígitos son los números de la aleación asignados por Copper Development Association (CDA) y los dos últimos corresponden a una modificación a la aleación original. La composición química es 99,9% cobre (Cu) [18].

- Acero AISI 4140 (Q&T)

Acero con aleación al cromo-molibdeno. Muy resistente a la torsión, buena resistencia al desgaste y al impacto, utilizable en temperaturas hasta 450°C sin perder su bonificación equivalente al AISI 4142 y ASTM a-193 Grado B-7. Es aplicable en la construcción de vehículos, engranajes y motores, partes y repuestos de maquinarias tales como arboles de transmisión, brazos de ejes, bombas cardanes, cigüeñales, pines, émbolos, moldes de inyección de plástico como el VCN 150 donde las exigencias son menos estrictas[10].

Tabla II.1. Composición nominal del Acero AISI 4140 (Q&T)[10].

Elemento	Composición (%)
Carbono, C	0.4
Silicio, Si	0.3
Manganeso, Mn	0.7
Cromo, Cr	1.1
Molibdeno, Mo	0.2

- Aluminio AA 6063-T5

En la serie de aleación de Aluminio 6xxx predomina la proporción de Magnesio y Silicio. El segundo dígito indica una modificación de la aleación, pero solo en el caso de que este número esté entre 1-9, si es cero (0) como en este caso indica que una aleación original. Los últimos dos dígitos no tienen especial significado, pero sirven para identificar las diferentes aleaciones de aluminio[2]. La designación T5 indica que es enfriado desde un proceso de conformado a temperatura elevada y envejecido de forma artificial. Propiedades mecánicas: Modulo de Elasticidad 68,9GPa; Dureza 71 HB 10/500; Esfuerzo de fluencia 193 MPa; Esfuerzo a la carga máxima 221 MPa[18].

Tabla II.2. Composición nominal del Aluminio 6063-T5[25].

Elemento	Composición (%)
Aluminio, Al	97.5
Hierro, Fe	0.35
Magnesio, Mg	0.450 - 0.90
Manganeso, Mn	0.1
Otros	0.15
Silicio, Si	0.20 - 0.60
Titanio, Ti	0.1
Zinc, Zn	0.1

2.1.1- MAQUINADO Y PREPARACIÓN DE LAS PROBETAS

Las barras de los materiales a utilizar fueron cortadas y mecanizadas en el taller de Precisión J.V. C.A, ubicado en la zona industrial de Turumo, Edo. Miranda. En dicho taller, se realizó el dimensionamiento y rectificado de las probetas para los ensayos de tracción e indentación. En la **figura II.1** y **II.2** se muestran las dimensiones de la probeta de tracción[6] e indentación respectivamente.

Una vez fabricadas las probetas se procedió a dar el acabado superficial por medio de lijado y pulido a las probetas. Para este proceso se pasaron cada una de las probetas por lijas de carburo de silicio (SiC), en el siguiente orden 240, 400, 600, 1200. Después se procedió a pulir las probetas, para ello se utilizó la máquina pulidora. Allí se colocó un paño de fieltro y se le agregó alúmina de 0,05 micras. El acabado superficial se realizó con la finalidad de eliminar irregularidades existentes en las probetas, y así evitar la influencia de éstas en los resultados de los ensayos de indentación. Las probetas de tracción fueron lijadas y pulidas de

igual forma que las probetas de indentación, a objeto de tratar de obtener una rugosidad superficial similar.

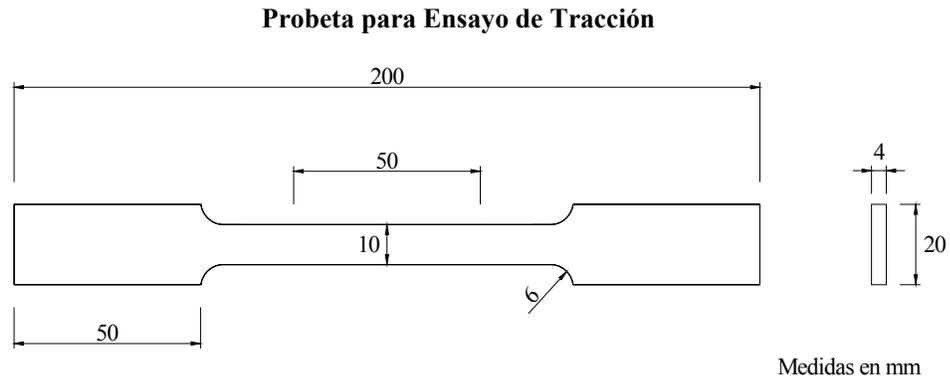


Figura II.1 Probeta de ensayo de tracción.

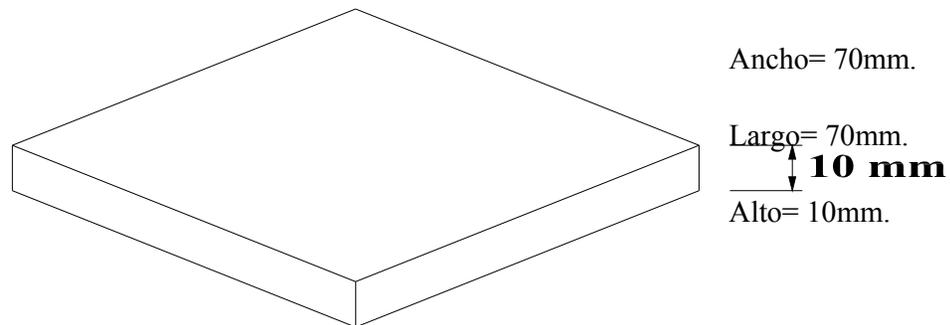


Figura II.2 Probeta de ensayo de indentación.

Adicionalmente, basado en las normas ASTM D 1474-98 y ASTM A-370, se determinó el número mínimo de probetas a utilizar en los respectivos ensayos. En el caso de los ensayos de indentación, es necesario ensayar tres (3) probetas,

de igual forma, para poder reportar lo más confiablemente posible las propiedades en tracción se necesitan ensayar como mínimo 3 muestras.

Tabla II.3 Especificación de la cantidad y tipo de probetas utilizadas, con sus respectivas normas.

Probetas	Material	Cantidad	Norma ASTM
Indentación	Acero	1	E 10-07 ^a
	Acero con recubrimiento Colmonoy 88	1	
	Aluminio	1	
	Cobre	1	
Tracción	Acero	3	A-370
	Acero con recubrimiento Colmonoy 88	9	
	Aluminio	3	
	Cobre	3	

2.1.2.- RECOCIDO DEL COBRE.

Las probetas de tracción e indentación de cobre fueron sometidas a un tratamiento de recocido. Para ellos se colocaron en el horno (figura II.3.a) a una temperatura de 500°C durante un periodo de 45min y luego se apagó el horno y se dejó enfriar lentamente (dentro del horno) hasta llegar a la temperatura ambiente. Este tratamiento térmico se realizó porque el material que se compró, tenía un severo trabajo en frío, y el material experimentó una reducción drástica de su capacidad de deformarse plásticamente. Mediante este tratamiento se logró una restauración de sus propiedades.



a)

b)

Figura II.3. a) Horno para tratamiento térmico. b) Extracción de la probeta de tracción de cobre.

2.2.- RECUBRIMIENTO

El material utilizado como recubrimiento es Colmonoy 88. Este material tiene una alta resistencia a la abrasión y corrosión. Es utilizado en tornillos de extrusión de plástico, asientos de válvulas, émbolos de las bombas, entre otros.

Tabla II.4 Composición química del Colmonoy 88[20].

Elemento	Composición (%)
Níquel, Ni	56,4
Tungsteno, W	17,3
Cromo, Cr	15
Silicio, Si	4
Hierro, Fe	3,5
Boro, B	3
Carbono, C	0,8

2.2.1.- DEPOSICIÓN DEL RECUBRIMIENTO

Una vez fabricadas y dado el correspondiente acabado superficial a las probetas anteriormente descritas, se procedió a su envío a la empresa PLASMATEC Ingenieros C.A. (*Carretera Vieja Caracas-Guarenas*) Allí las probetas se recubrieron con Colmonoy 88, de acuerdo a la práctica operativa que utiliza la citada empresa. La deposición del recubrimiento se realizó con una pistola JP-5000, bajo las siguientes condiciones de operación: Presión del combustible(Kerosene) 1,17Mpa; flujo de Oxígeno 11,75 s⁻¹, flujo de Nitrógeno 0,23 s⁻¹; distancia de rociado 330 mm; flujo de combustible 0,00631 s⁻¹ y la tasa de alimentación de Colmonoy 88 1,5 g s⁻¹[23].

2.2.2.- DETERMINACIÓN DEL ESPESOR DEL RECUBRIMIENTO.

El espesor del recubrimiento fue estimado mediante el método de corrientes inducidas[22]. Dentro del área de los Ensayos No Destructivos, la técnica conocida como Corrientes inducidas, destaca por la amplia diversidad de aplicaciones que van desde la simple detección y localización de discontinuidades (defectología) hasta la determinación de características físicas de los materiales tales como medición de espesores de recubrimientos, determinación de conductividad eléctrica y permeabilidad magnética, diferenciación de materiales en base a su composición, dureza, microestructura, tratamientos térmicos, perfilometría, determinación de propiedades geométricas etc.

En la técnica de inspección por corrientes inducidas, la pieza o componente a ser inspeccionado se coloca dentro de una bobina (o en contacto con ella) por la cual circula una corriente alterna (AC) que recibe el nombre de “corriente de excitación”. Como una consecuencia de lo anterior, se produce en las proximidades de la bobina un Campo Electromagnético llamado Campo Primario (H_p) el cual produce el flujo de corrientes inducidas sobre la pieza inspeccionada. Estas corrientes inducidas a su vez producen un segundo campo

electromagnético llamado Campo Secundario (H_s), cuya principal característica es la de tener un sentido opuesto al primario (Ley de Lenz) Estos campos se combinan para producir un campo electromagnético resultante ($H_p - H_s$) [22].

Las variaciones de los espesores del recubrimientos, producen cambios en el flujo de las corrientes inducidas, y en el campo secundario (H_s) y a través de este en el campo resultante ($H_p - H_s$) [22]. Este campo resultante actúa sobre la bobina inductora, produciendo variaciones en el voltaje alterno que se le aplica y en su impedancia eléctrica. Estas variaciones pueden ser detectadas y procesadas, para ser representadas en algún dispositivo de medición analógico o digital, tubo de rayos catódicos o un registrador gráfico. Este método permite la medición de espesores en recubrimientos base níquel sobre sustrato magnético o no magnético[5].

Pasos a seguir para la obtención del espesor de recubrimiento:

1. Ajuste con el patrón de medición (se colocan ambas bobinas en el material sin recubrimiento, es decir, sobre el material base).
2. Punto de correlación con el material de referencia (Se coloca la bobina sobre el recubrimiento de espesor conocido, manteniendo la otra en el material sin recubrimiento).
3. Punto determinado por el espesor de prueba (Recubrimiento de espesor desconocido).
4. Mediante la siguiente expresión se obtiene el valor del espesor del recubrimiento:

$$e_3 = \frac{y_3 * e_2}{y_2} \quad (2.1)$$

Dónde

y_3 = Distancia del espesor desconocido medida en dirección al eje vertical y respecto al punto patrón.

y_2 = Distancia del espesor conocido medida en dirección al eje vertical y respecto al punto patrón.

e_2 = Espesor conocido.

Luego de realizar estas mediciones se procedió a rectificar las probetas y así obtener los espesores deseados: $e_1 = 0,2\text{mm}$; $e_2 = 0,4\text{mm}$; $e_3 = 0,6\text{mm}$.



Figura II.4 Probetas para ensayos de indentación (superior) y de tracción (inferior).

2.3- ENSAYOS DE INDENTACIÓN

Los ensayos de indentación se realizaron en una máquina marca OTTO WOLPERT LESTOR[®], con un penetrador Brinell ($D = 2,5\text{mm}$), y se aplicaron cargas sobre la muestra, las cuales varían para cada material como se muestra en el siguiente cuadro:

Tabla II.5 Cargas utilizadas para cada material a ensayar

Material	Cargas (Kgf)						
	Acero	40	50	62,5	100	150	187,5
Aluminio	10	20	30	40	50	60	100
Cobre	5	20	30	40	50	62,5	--
Acero rec. $e_1 = 0,2\text{mm}$	62,5	100	125	150	187,5	250	--
Acero rec. $e_2 = 0,4\text{ mm}$	62,5	100	125	150	187,5	250	--
Acero rec. $e_3 = 0,6\text{ mm}$	62,5	100	125	150	187,5	250	--

Cada carga fue aplicada por un periodo de 10 a 15seg. Al retirar la carga se realizó la medición del tamaño de la huella promediando dos (2) de sus diámetros perpendiculares. Se realizaron cinco (5) repeticiones por cada carga aplicada. La distancia entre el centro de dos indentaciones adyacentes debe ser tres veces el diámetro del indentor[4].

Con los valores de carga y diámetro de la huella se obtuvieron las presiones medias y las deformaciones para cada punto del ensayo mediante las ecuaciones (1.1) y (1.4) respectivamente.



a)

b)

Figura II.5 a) Máquina de Indentación. b) Lente visor

2.4.- ENSAYOS DE TRACCIÓN UNIAXIAL.

Los ensayos de tracción de las probetas de cobre se realizaron en una máquina universal de ensayo (figura III.6). Se realizaron mediciones del área inicial (A_0) de la sección transversal de cada una de las probetas con un vernier digital. Para ello se tomaron tres mediciones de cada lado de la sección transversal y se calculó el área inicial promedio. Luego se marcó la longitud calibrada (L_0). Después se colocó la probeta en la máquina y se agarró cada extremo con las

mordazas, posteriormente se ubicó un extensómetro entre las líneas de calibración, para tomar medidas de elongaciones de la probeta para cada incremento en la carga. Luego para las probetas de Acero AISI 4140(Q&T) recubiertas y sin recubrimiento y las de Aluminio AA6063-T5, se realizaron en una máquina de ensayo universal automatizada marca GALDABINI. La diferencia con el ensayo anterior es que no se utilizó extensómetro y los valores de carga y elongación se registran en una computadora. Luego de realizar tres ensayos de tracción por material y por espesor de recubrimiento se procedió a promediar los valores de carga y elongación para cada caso. Mediante las ecuaciones correspondientes (1.20 y 1.21) se calcularon los valores de esfuerzo ingenieril y deformación ingenieril respectivamente. Luego, utilizando otras ecuaciones (1.25 y 1.28) se obtuvieron los valores de esfuerzo y deformación real. Con estos últimos valores se construyeron las curvas esfuerzo deformación.



Figura II.6 Máquina Universal de Ensayos

2.5.- CONSTRUCCIÓN DE LA CURVA DE ESFUERZO CONTRA DEFORMACION A PARTIR DE INDENTACION.

La deformación de indentación “ $\epsilon_{\text{indentación}}$ ” fue calculada mediante la ecuación correspondiente (1.4). Para el cálculo del esfuerzo de indentación “ $\sigma_{\text{indentación}}$ ” es necesario calcular el valor empírico “ δ ” propuesto por Tabor[24]. Y de la curva esfuerzo deformación, obtenida en el ensayo de tracción, se tomaron

valores de esfuerzo correspondientes a las deformaciones de indentación. Luego, los valores de presión media obtenidos en los ensayos de indentación fueron divididos entre los esfuerzos de tracción antes mencionados:

$$\delta = \frac{P_m}{\sigma_{traccion}} \quad (2.2)$$

δ = Valor empírico de Tabor.

$\sigma_{tracción}$ = Esfuerzo de tracción [MPa].

P_m = Presión media [MPa].

Se realizó el promedio de los valores de “ δ ”. Con este valor promedio se calcularon los esfuerzos con la relación de Tabor.

$$\sigma = \frac{P_m}{\delta} \quad (2.3)$$

Con los valores de deformación obtenidos mediante la ecuación correspondiente (1.4), y los valores de esfuerzo calculados anteriormente, se construyó la curva esfuerzo-deformación por indentación. Posteriormente, se compararon las curvas esfuerzo-deformación obtenidas por el ensayo de tracción con las de indentación. Estos cálculos fueron realizados para cada uno de los materiales ensayados (aluminio AA6063T5, cobre C10100 y acero AISI 4140 (Q&T)).

2.6.- CURVAS DEL SISTEMA SUSTRATO-RECUBRIMIENTO

Se realizó una comparación entre las curvas esfuerzo-deformación obtenidas por tracción, del acero 4140 (sin recubrimiento) con las del acero recubierto con Colmonoy 88.

Con los valores del ensayo de indentación (carga, diámetro de la huella) de las probetas sistema sustrato-recubrimiento, se calcularon valores de dureza Brinell mediante la ecuación correspondiente (1.9).

Mediante el modelo de Lesage y Pertuz[16] se obtuvieron valores de dureza del recubrimiento. La ecuación que rige este modelo es la siguiente:

$$A * H_f^2 + B * H_f + C = 0 \quad (2.4)$$

siendo

$$\left\{ \begin{array}{l} A = f^2 \cdot (f - 1) \\ B = (-2f^3 + 2f^2 - 1) \cdot H_s + (1 - f) \cdot H_c \\ C = f \cdot H_c \cdot H_s + f^2 \cdot (f - 1) \cdot H_s^2 \end{array} \right.$$

$$f = \left(\frac{t}{d}\right)^m$$

El valor de “m” es calculado por el desarrollo de una regresión lineal de todos los puntos experimentales obtenidos para el sistema sustrato-recubrimiento y deducido de la siguiente relación[16].

$$\ln d = m * \ln P + b$$

H_c = Dureza del conjunto.

H_s = Dureza del sustrato.

H_f = Dureza del recubrimiento.

CAPÍTULO III: ANÁLISIS Y RESULTADOS

Una vez aplicada cada una de las técnicas experimentales descritas en el capítulo anterior, se presentan a continuación los resultados obtenidos con sus respectivos análisis mediante los siguientes puntos: Ensayo de tracción uniaxial, Ensayo de indentación, Comparación de las curvas esfuerzo vs deformación obtenidas por tracción uniaxial y por indentación; y por último, el sistema sustrato-recubrimiento.

3.1 ENSAYO DE TRACCIÓN UNIAXIAL

En las **tablas III.1, 2, 3** se presentan los resultados del ensayo de tracción uniaxial del Aluminio AA6063-T5, Cobre C10100 y Acero AISI 4140 (Q&T). Se especifica el valor de la elongación, carga, deformación nominal, esfuerzo nominal, deformación real y esfuerzo real. Estos valores representan el promedio de probetas ensayadas para cada material. Todo lo contenido en estas tablas se resume en las gráficas siguientes. En la **tabla III.4** se presentan los valores promedios de elongación y carga (zona plástica), obtenidos mediante el ensayo de tracción realizado a las probetas de Acero AISI 4140 (Q&T) recubiertas con Colmonoy 88 para tres espesores diferentes ($e= 0,6\text{mm}; 0,4\text{mm}; 0,5\text{mm}$).

Tabla III.1 Valores del ensayo de tracción del aluminio AA6063-T5.

Elongación (mm)	Carga (N)	Nominales		Reales	
		e(mm/mm)	S (MPa)	ϵ (mm/mm)	σ (MPa)
0	0	0	0	0	0
0,2	662,66667	0,004	12,08577	0,003992021	12,134114
0,49	1849	0,0098	33,722218	0,009752291	34,052696
0,79	3556,6667	0,0158	64,866786	0,015676479	65,891682
1,39	7353,6667	0,0278	134,11679	0,027420596	137,84524
1,69	8264	0,0338	150,71953	0,033241334	155,81385
2,29	9128	0,0458	166,47723	0,044782143	174,10189
2,59	9293,3333	0,0518	169,4926	0,050502982	178,27231
3,49	9743,3333	0,0698	177,69973	0,067471715	190,10318
3,79	9866	0,0758	179,93694	0,073064571	193,57616
4,09	9973,3333	0,0818	181,89449	0,07862632	196,77346
4,69	10188	0,0938	185,8096	0,089657872	203,23854
4,99	10264,667	0,0998	187,20786	0,095128345	205,8912
5,89	10429	0,1178	190,20498	0,111362468	212,61113
6,49	10504	0,1298	191,57284	0,122040626	216,43899
7,09	10502,667	0,1418	191,54852	0,132605965	218,7101
7,39	10440,333	0,1478	190,41168		
7,69	10318,333	0,1538	188,18663		
7,99	10124,667	0,1598	184,65452		

Tabla III.2 Valores del ensayo de tracción del cobre C10100.

Elongación (mm)	Carga (N)	Nominales		Reales	
		ϵ (mm/mm)	S (MPa)	ϵ (mm/mm)	σ (MPa)
0	0	0	0	0	0
0,00275	441	0,00007	8,643209	7,00E-05	8,6438141
0,0165	882	0,0003	17,286418	0,0003	17,291604
0,0665	1323	0,0013	25,929627	0,0012992	25,963336
0,1	1494,5	0,002	29,290875	0,001998	29,349457
0,15	1617	0,003	31,691766	0,0029955	31,786842
0,2	1739,5	0,004	34,092658	0,003992	34,229028
0,25	1862	0,005	36,493549	0,0049875	36,676017
0,5	2450	0,01	48,017828	0,0099503	48,498006
0,75	2891	0,015	56,661037	0,0148886	57,510953
1	3283	0,02	64,343889	0,0198026	65,630767
1,5	4081,7	0,03	79,997701	0,0295588	82,397632
2	4802	0,04	94,114943	0,0392207	97,87954
2,5	5429,2	0,05	106,40751	0,0487902	111,72788

Tabla III.3 Valores del ensayo de tracción del acero AISI 4140 (Q&T).

Elongación (mm)	Carga (N)	Nominales		Reales	
		ϵ (mm/mm)	S (MPa)	ϵ (mm/mm)	σ (MPa)
0,006	102,73	0,00006	1,9442703	6E-05	2,0198134
0,315	5393,18	0,00315	102,07419	0,003145	105,87672
0,753	12892,27	0,00753	244,00593	0,0075018	252,54454
1,4	23969,7	0,014	453,66308	0,0139029	468,03527
2,147	36759,24	0,02147	695,72473	0,0212428	715,12851
2,574	44070	0,02574	834,09197	0,0254143	855,5615
2,6	44713	0,026	846,26173	0,0256677	868,26453
2,7	46479	0,027	879,68597	0,0266419	903,43749
2,811	46788	0,02811	885,53427	0,0277222	910,42664
3,291	47638	0,03291	901,62181	0,0323801	931,29419
4,002	48912	0,04002	925,73421	0,0392399	962,78209
5,803	51520	0,05803	975,09459	0,0564087	1031,6793
6,958	52246	0,06958	988,83524	0,067266	1057,6384
6,961	52247	0,06961	988,85417	0,0672941	1057,6883
6,964	52248	0,06964	988,8731	0,0673221	1057,7382
7,204	52319	0,07204	990,21688	0,0695634	1061,5521
7,81	52402	0,0781	991,78778	0,0752002	1069,2464
8,086	52372	0,08086	991,21998	0,077757	1071,37
8,2	52341	0,082	990,63326	0,0788112	1071,8652
8,405	52232	0,08405	988,57027		
9,002	51114	0,09002	967,41042		
10	47479	0,1	898,6125		
10,856	42061	0,10856	796,06858		

Tabla III.4 Valores del ensayo de tracción Acero AISI 4140(Q&T)/Colmonoy 88.

espesor 0,2mm		espesor 0,4mm		espesor 0,6mm	
Elongación (mm/mm)	Carga (N)	Elongación (mm/mm)	Carga (N)	Elongación (mm/mm)	Carga (N)
4,074	47871	3,627	48269,5	3,647	46344
4,414	48250,5	4,32	48827	4,056	46778
4,877	48554,5	4,775	49350	4,451	47200
5,342	48935,5	5,436	50055	4,841	47607
5,943	49358,5	6	50583,5	5,291	48162,5
6,415	49678,5	6,643	50996,5	5,662	48595
6,97	50026	7,271	51228	6,062	49007
7,356	50133,5	7,556	51282	6,461	49353,5
7,489	50150,5	7,8	51303	6,87	49636
				7,264	49806,5
				7,663	49939,5
				8,063	49985,5

En la **figura III.1** se muestra la curva carga vs elongación del Aluminio AA6063-T5 obtenidas a partir del ensayo de tracción uniaxial, mientras que en la **figura III.2** se muestran las curvas esfuerzo vs deformación nominal y real. El esfuerzo de fluencia nominal (S_y) obtenido es de 150 MPa, mientras que el esfuerzo nominal a la carga máxima (S_{ut}) es igual a 191 MPa. En comparación con los valores extraídos de la literatura[2] los cuales son: $S_y= 145$ MPa; $S_{ut}= 186$ MPa, la diferencia del S_y experimental con el teórico es de 3,33%, mientras que para el S_{ut} es de 2,61%. El funcionamiento de los equipos utilizados, velocidad de la carga aplicada, defecto en la forma de la probeta, etc. son parámetros que generan las variaciones en los resultados obtenidos.

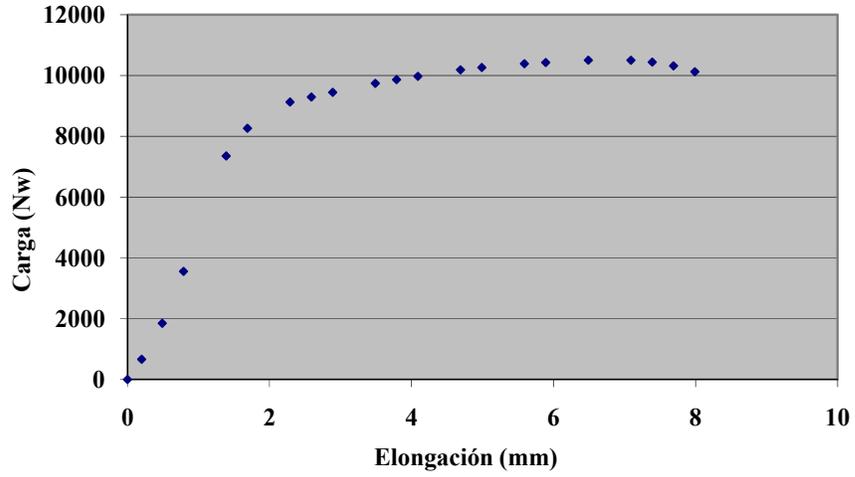


Figura III.1 Curva carga vs elongación (Aluminio AA6063T5).

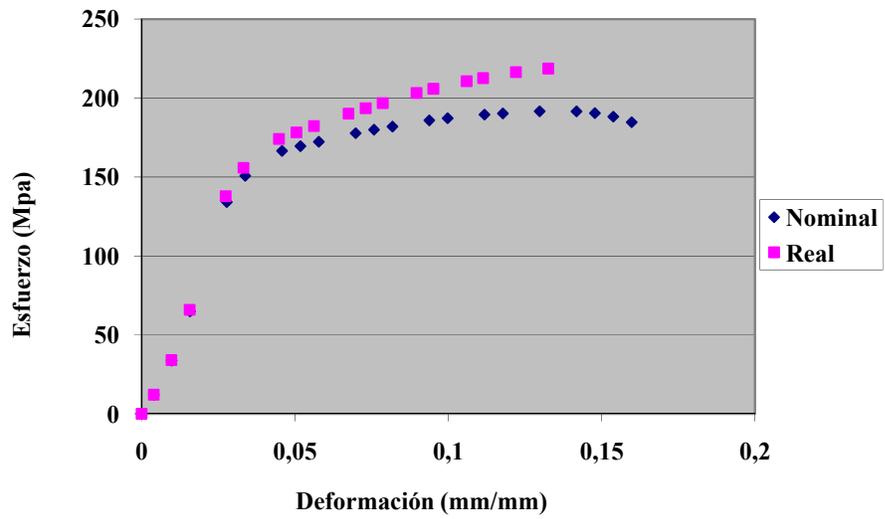


Figura III.2 Curva esfuerzo vs deformación (Aluminio AA6063T5).

En la **figura III.3, 4** se muestran las curva carga vs elongación y esfuerzo vs deformación del Cobre C10100 respectivamente, obtenidas a partir del ensayo de tracción uniaxial. En la **figura III.4** se observa que el esfuerzo de fluencia nominal (S_y) obtenido es de 26 MPa, comparando este valor con el extraído de la literatura[2] ($S_y= 33,3$ MPa), se observa una diferencia del 21,92%, la cual es generada por el historial termomecánico del material.

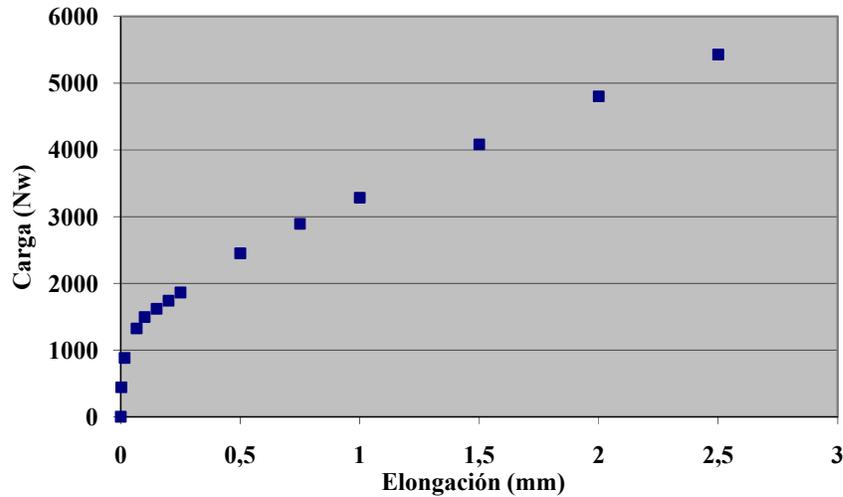


Figura III.3 Curva carga vs elongación (Cobre C10100).

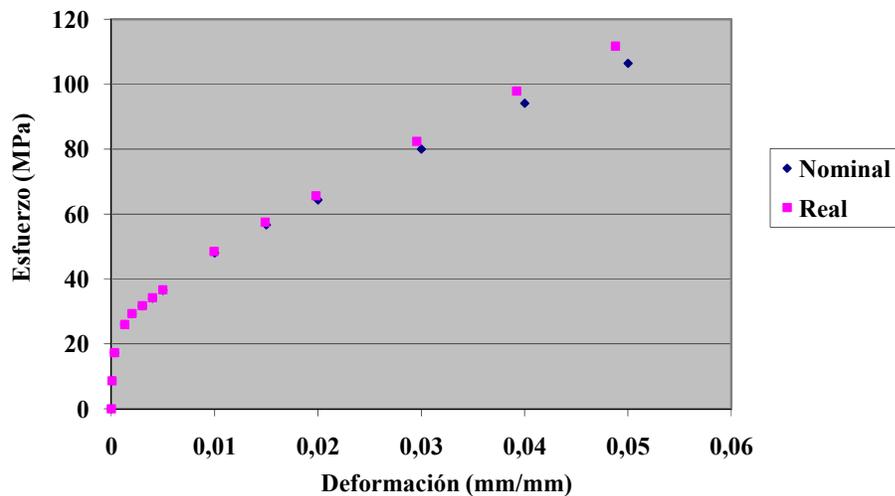


Figura III.4 Curva esfuerzo vs deformación (Cobre C10100).

En la **figura III.5** se muestra la curva carga vs elongación del Acero AISI 4140(Q&T), seguida en la **figura III.6** por la curva esfuerzo vs deformación real y nominal. . El esfuerzo de fluencia nominal (S_y) obtenido es de 834 MPa, mientras que el esfuerzo nominal a la carga máxima (S_{ut}) es igual a 990 MPa. En comparación con los valores extraídos de la literatura[10] los cuales son: $S_y= 686-882$ MPa; $S_{ut}= 931-1127$ MPa, se puede notar que los valores experimentales se encuentran dentro del intervalo de los valores teóricos, por consiguiente el resultado del ensayo presentan un alto grado de confiabilidad.

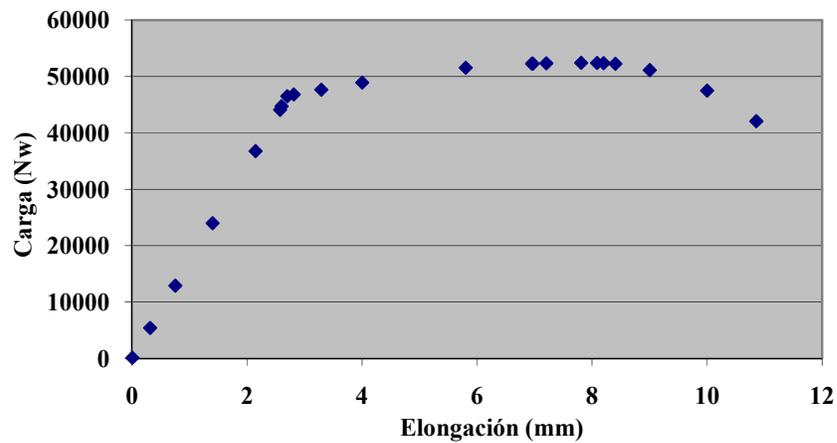


Figura III.5 Curva carga vs elongación (Acero AISI 4140 Q&T).

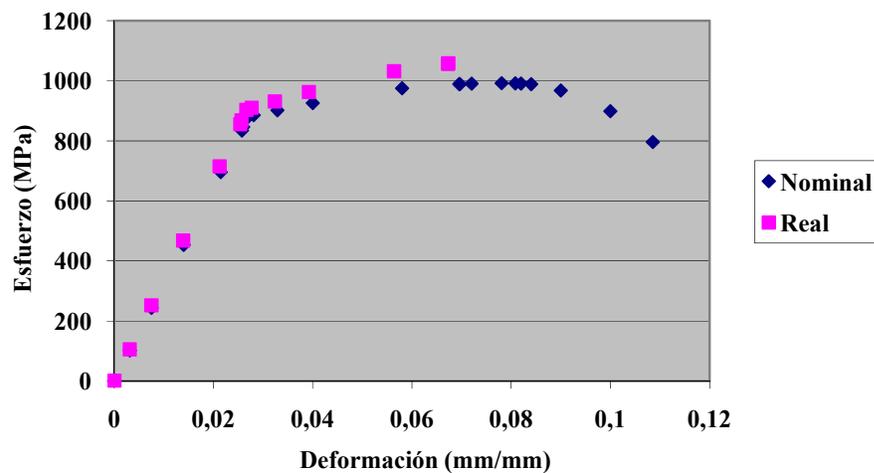


Figura III.6 Curva esfuerzo vs deformación (Acero AISI 4140 Q&T).

Como es bien conocido y se pudo observar en los tres materiales, los valores de esfuerzo real a partir del punto de fluencia, son mayores que los esfuerzos nominales, esto se debe a que los valores nominales no toma en cuenta la reducción de área que ocurre en el transcurso del ensayo.

3.2 ENSAYO DE INDENTACIÓN

En las **tablas III.5, 8, 11** se presentan las mediciones del ensayo de indentación del Aluminio AA6063-T5, Cobre C10100, Acero AISI 4140 (Q&T) respectivamente, en ellas se especifica la carga aplicada, diámetro de huella y área proyectada. De igual forma en las **tablas III.6, 9, 12** se muestran los valores de deformación **ec.(1.4)**, la presión media **ec.(1.1)**, y los esfuerzos de tracción modelados. Las **tablas III.7, 10, 13** contienen los coeficientes de Tabor **ec.(2.2)**, estos valores dependen del modelo que se utilizó, es por ello que se tienen tres (3) valores de coeficientes por cada material. Para verificar los valores calculados anteriormente se realizó una comparación con los trabajos desarrollados por Tabor[24], Jeong-Hoon[13] y B. S.-J. Kang, Z. Yao, E. J. Barbero[14] los cuales obtuvieron 2,8; 3 y 2,92 respectivamente. Para el caso del Aluminio AA6063-T5 el coeficiente con Hollomon y Swift es 3,08, mientras que el asociado al modelo de Voce es igual 3,67, el cual difiere considerablemente de los valores referenciales nombrados anteriormente.

En la **tabla III.6** se observa como a medida que aumenta la deformación la presión media aumenta, mientras que el esfuerzo de tracción modelado por Voce se mantiene constante, lo cual puede ocurrir porque alcanza el valor de esfuerzo de saturación (en donde la tasa de generación de dislocaciones es igual a la tasa de eliminación de dislocaciones[16], y es por eso que el coeficiente calculado empíricamente para este modelo y para este material no se encuentra en el intervalo de valores expuestos anteriormente. Para el caso del Cobre C10100 los coeficientes de la relación empírica de Tabor fueron los siguientes: Para Hollomon 2,89; Voce 2,67; Swift 2,69. El valor de Voce y Swift se encuentra por

debajo del intervalo de valores referenciados anteriormente, mientras que el valor correspondiente a Hollomon es aceptable. Para el Acero AISI 4140 (Q&T), el coeficiente obtenido fue el mismo para los tres modelos el cual es de 2,92, siendo este un valor bastante confiable con respecto a los valores teóricos y por ende un valor correcto. Para los tres materiales el trabajo de Tabor se ajustó en buena forma al modelo de Hollomon, debido a que las deformaciones alcanzadas en los ensayos son pequeñas, donde los materiales experimentan endurecimiento por deformación.

Las **tablas III.14, 15, 16** presentan los valores obtenidos del ensayo de indentación sobre las probetas de Acero AISI 4140 (Q&T) recubiertas con Colmonoy 88 en sus respectivos espesores.

Tabla III.5 Valores del ensayo de indentación (Aluminio AA6063T5).

m (kg)	P (N)	Diámetro de la huella "d" (mm)					d Prom (mm)	Area (m ²)
10	98	0,44	0,44	0,46	0,45	0,44	0,446	1,56E-07
20	196	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	0,61	2,92E-07
30	294	0,73	0,74	0,74	0,76	0,74	0,742	4,32E-07
40	392	0,85	0,85	0,85	0,85	0,87	0,854	5,73E-07
60	588	1,02	1,03	1,01	1	1,02	1,016	8,11E-07

Tabla III.6 Valores para obtener el coeficiente de Tabor (Aluminio AA6063T5).

		Esfuerzos de Tracción		
		Hollomon	Voce	Swift
ϵ (mm/mm)	Pm (MPa)	σ (MPa)	σ (MPa)	σ (MPa)
0,03568	627,28727	207,355	187,275	207,378
0,0488	670,66636	215,674	187,275	215,698
0,05936	679,9072	221,047	187,275	221,072
0,06832	684,35342	224,986	187,275	225,011
0,08128	725,27053	229,949	187,275	229,974

Tabla III.7 Coeficientes de Tabor asociados a los modelos (Aluminio AA6063T5).

Coeficiente de Tabor			
	Hollomon	Voce	Swift
	δ	δ	δ
	3,03	3,35	3,02
	3,11	3,58	3,11
	3,08	3,63	3,08
	3,04	3,65	3,04
	3,15	3,87	3,15
Promedio	3,08	3,62	3,08

Tabla III.8 Valores del ensayo de indentación (Cobre C10100).

m (kg)	P (N)	Diámetro de la huella "d" (mm)					d Prom (mm)	Area (m ²)
62,5	612,5	1,29	1,29	1,28	1,28	1,29	1,29	1,31E-06
50	490	1,18	1,17	1,15	1,15	1,17	1,175	1,08E-06
40	392	1,09	1,11	1,09	1,08	1,08	1,085	9,24E-07
30	294	0,97	0,97	0,99	0,98	0,97	0,97	7,39E-07
20	196	0,84	0,83	0,85	0,83	0,84	0,84	5,54E-07
5	49	0,45	0,44	0,43	0,44	0,44	0,445	1,55E-07

Tabla III.9 Valores para obtener el coeficiente de Tabor (Cobre C10100).

		Esfuerzos de Tracción		
		Hollomon	Voce	Swift
ϵ (mm/mm)	Pm (MPa)	σ (MPa)	σ (MPa)	σ (MPa)
0,1032	468,63723	166,579184	191,35776	188,54574
0,094	451,88764	158,259329	178,755692	176,29309
0,0868	423,97155	151,488378	168,686478	166,55395
0,0776	397,84507	142,455733	155,550341	153,89724
0,0672	353,67765	131,640457	140,327792	139,26733
0,0356	315,05486	92,8941361	91,5383117	92,043385

Tabla III.10 Coeficientes de Tabor asociados a los modelos (Cobre C10100)

Coefficiente de Tabor			
	Hollomon	Voce	Swift
	δ	δ	δ
	2,81	2,45	2,49
	2,86	2,53	2,56
	2,80	2,51	2,55
	2,79	2,56	2,59
	2,69	2,52	2,54
	3,39	3,44	3,42
Promedio	2,89	2,67	2,69

Tabla III.11 Valores del ensayo de indentación (Acero AISI 4140 Q&T).

m (kg)	P (N)	Diámetro de la huella "d" (mm)					d prom (mm)	Área (m²)
40	392	0,44	0,43	0,44	0,45	0,44	0,44	1,521E-07
50	490	0,46	0,49	0,48	0,48	0,48	0,478	1,795E-07
62,5	612,5	0,51	0,54	0,53	0,53	0,53	0,528	2,19E-07
100	980	0,68	0,61	0,63	0,63	0,64	0,638	3,197E-07
150	1470	0,75	0,76	0,76	0,76	0,76	0,758	4,513E-07

Tabla III.12 Valores para obtener el coeficiente de Tabor (Acero AISI 4140 Q&T).

		Esfuerzos de Tracción		
		Hollomon	Voce	Swift
ϵ (mm/mm)	Pm (MPa)	σ (MPa)	σ (MPa)	σ (MPa)
0,0352	2578,04701	945,791	943,785	950,712
0,03824	2730,55171	960,040	959,524	961,386
0,04224	2797,36004	977,437	978,354	975,614
0,05104	3065,45424	1011,404	1013,257	1007,660
0,06064	3257,53464	1043,365	1042,952	1043,822

Tabla III.13 Coeficientes de Tabor asociados a los modelos (Acero AISI 4140 Q&T).

Coeficiente de Tabor			
	Hollomon	Voce	Swift
	δ	δ	δ
	2,73	2,73	2,71
	2,84	2,85	2,84
	2,86	2,86	2,87
	3,03	3,03	3,04
	3,12	3,12	3,12
Promedio	2,92	2,92	2,92

Tabla III.14 Valores del ensayo de indentación para la probeta de recubierta (espesor = 0,6mm).

m (kg)	P(N)	Diámetro de la huella "d" (mm)						d prom (mm)	Area (m ²)
250	2450	0,8	0,81	0,82	0,81	0,81	0,82	0,812	5,174E-07
187,5	1837,5	0,69	0,7	0,7	0,72	0,7	0,7	0,702	3,867E-07
150	1470	0,6	0,63	0,63	0,61	0,64	0,64	0,625	3,068E-07
125	1225	0,57	0,54	0,58	0,57	0,58	0,56	0,567	2,522E-07
100	980	0,52	0,5	0,51	0,49	0,51	0,5	0,505	2,003E-07
62,5	612,5	0,41	0,4	0,38	0,38	0,41	0,41	0,398	1,246E-07

Tabla III.15 Valores del ensayo de indentación (espesor = 0,4mm).

m (kg)	P(N)	Diámetro de la huella "d" (mm)						d prom (mm)	Area (m ²)
250	2450	0,86	0,87	0,85	0,86	0,88	0,84	0,860	5,809E-07
187,5	1837,5	0,73	0,74	0,75	0,73	0,74	0,74	0,738	4,272E-07
150	1470	0,63	0,64	0,63	0,63	0,64	0,66	0,638	3,2E-07
125	1225	0,58	0,56	0,58	0,58	0,57	0,57	0,573	2,582E-07
100	980	0,51	0,5	0,52	0,52	0,49	0,5	0,507	2,016E-07

Tabla III.16 Valores del ensayo de indentación para la probeta de recubierta (espesor = 0,2mm).

m (kg)	P(N)	Diámetro de la huella "d" (mm)						d prom (mm)	Área (m ²)
250	2450	0,95	0,96	0,95	0,96	0,94	0,96	0,953	7,138E-07
187,5	1837,5	0,84	0,82	0,82	0,81	0,84	0,83	0,827	5,367E-07
150	1470	0,69	0,69	0,7	0,69	0,71	0,7	0,697	3,812E-07
125	1225	0,63	0,63	0,62	0,63	0,62	0,63	0,627	3,084E-07
100	980	0,55	0,54	0,53	0,54	0,54	0,54	0,540	2,29E-07

3.3.-COMPARACIÓN DE LAS CURVAS ESFUERZO - DEFORMACIÓN OBTENIDAS POR EL ENSAYO DE TRACCIÓN UNIAXIAL Y POR INDENTACIÓN.

En las tablas **III.17, 19, 20.** se muestran los valores de esfuerzo y deformación, del ensayo de tracción uniaxial e indentación en el Aluminio aa6063-T5, modelados por Hollomon, Voce y Swift respectivamente.

Tabla III.17 Valores esfuerzo y deformación modeladas por Hollomon (Aluminio AA6063-T5).

Tracción		Indentación	
ϵ mm/mm)	σ(MPa)	ϵ mm/mm)	σ(MPa)
0,0040496	157,76216	0,0040496	144,7195
0,0095097	175,62099	0,0137078	175,57632
0,0108959	178,64889	0,01512	178,32646
0,0222491	195,4108	0,0265829	195,01075
0,02513	198,42273	0,048	214,15992
0,0488	215,67428	0,0784	231,47946
0,05936	221,04736	0,08128	232,80693
0,06832	224,9857	0,10752	243,3636
0,08128	229,94879	0,13376	251,93478
0,1256196	242,87483	0,1585089	258,80614

En la **figura III.7** se observan las curvas esfuerzo vs deformación del Aluminio AA6063-T5 modeladas por Hollomon a partir de los datos experimentales del ensayo de tracción con un coeficiente de correlación (R^2) de 0,9977, mientras que para los datos experimentales del ensayo de indentación el R^2 es igual a 0,9648. Se nota que ambas curvas representan un buen ajuste con respecto a los valores experimentales, debido a que R^2 es aproximadamente 1. A su vez se observa que los valores de $\sigma_y= 157,76$ MPa y $\sigma_{ut}= 242,87$ MPa del ensayo de tracción, en comparación con los de indentación ($\sigma_y= 144,72$ MPa y $\sigma_{ut}= 258,81$ MPa) no muestran una diferencia significativamente importante. Tanto la curva de tracción como la de indentación manifiestan un aumento del esfuerzo a medida que aumenta la deformación. Se aprecia un solapamiento entre la curva de tracción y la de indentación.

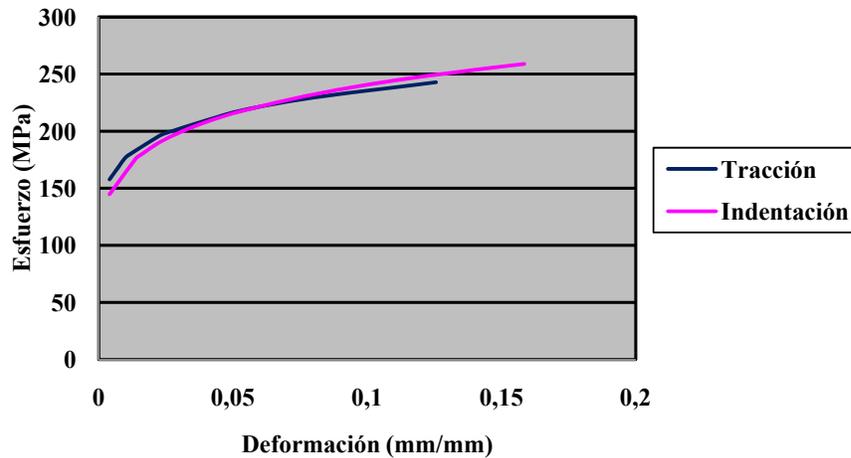


Figura III.7 Curva esfuerzo vs deformación modeladas por Hollomon (Aluminio AA6063-T5).

Tabla III.18 Propiedades mecánicas del Aluminio AA6063-T5 obtenidas por Hollomon.

	Tracción	Indentación
σ_y (MPa)	157,76216	144,7195
σ_{ut} (MPa)	242,87483	258,80614

Tabla III.19 Valores de esfuerzo y deformación del ensayo de indentación y tracción (zonas plásticas) modeladas por Voce (Aluminio AA6063-T5).

Tracción		Indentación	
ϵ (mm/mm)	σ(MPa)	ϵ (mm/mm)	σ(MPa)
0,0020462	125,61741	0,0020462	155,1719
0,0095097	186,14639	0,0095097	159,4361
0,0108959	186,73806	0,0108959	160,22638
0,0122978	187,02162	0,0122978	161,02501
0,0137078	187,15587	0,0137078	161,82771
0,0193755	187,26905	0,0193755	165,04856
0,0222491	187,27353	0,0222491	166,67808
0,0236844	187,27418	0,0236844	167,49113
0,06832	187,27475	0,06832	192,48627
0,08128	187,27475	0,08128	199,63976

La **figura III.8** muestra las curvas esfuerzo vs deformación del Aluminio 6063-T5 modeladas por Voce a partir de los datos experimentales del ensayo de tracción con un R^2 de 0,9854, mientras que para los datos del ensayo de indentación el R^2 es igual a 0,9287. La curva de tracción presenta un comportamiento horizontal a partir de una deformación de 0,0123 aproximadamente. Este comportamiento se debe a que se alcanza el esfuerzo de saturación. Para la curva de indentación se observa que el esfuerzo presenta una tendencia ascendente a medida que crece la deformación.

En la **figura III.9** se exponen las curvas esfuerzo vs deformación del Aluminio AA6063-T5 modeladas por Swift a partir de los datos experimentales del ensayo de tracción con un R^2 de 0,9687, mientras que para los datos empíricos del ensayo de indentación el R^2 es igual a 0,9654. Se observas que ambas curvas representan un buen ajuste con respecto a los valores experimentales, debido a que R^2 es aproximadamente 1. El esfuerzo de fluencia obtenidos mediante este modelo fueron los siguientes: tracción $\sigma_y= 159$ MPa, indentación $\sigma_y= 176$ MPa. Se muestra que existe una superposición entre la curva de tracción y de indentación, para valores de deformaciones entre 0,02 y 0,08.

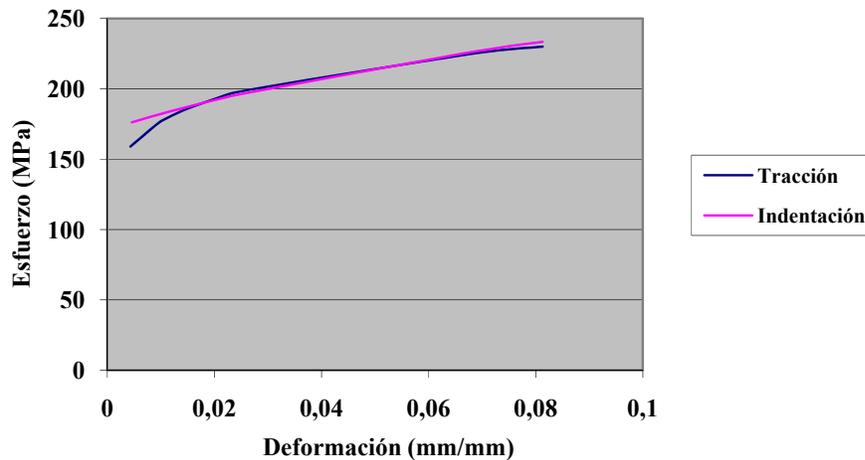


Figura III.9 Curva de esfuerzo vs deformación modeladas por Swift (Aluminio AA6063-T5).

Tabla III.21 Valor de coeficiente de correlación al cuadrado (Aluminio AA6063-T5).

	Hollomon R^2	Voce R^2	Swift R^2
Ensayo de Tracción	0,9977	0,9854	0,9687
Ensayo de Indentación	0,9648	0,9287	0,9654

En las tablas **III.22, 24, 25** se muestran los valores de esfuerzo y deformación, del ensayo de tracción uniaxial e indentación en el Cobre C10100, modelados por Hollomon, Voce y Swift respectivamente.

Tabla III.22 Valores de esfuerzo y deformación del ensayo de indentación y tracción (zona plástica) modeladas por Hollomon (Cobre C10100).

Tracción		Indentación	
ϵ (mm/mm)	σ(MPa)	ϵ (mm/mm)	σ(MPa)
0,0022	20,164001	0,0022	13,324393
0,142004	198,46509	0,1653952	223,21263
0,170005	219,06466	0,197994	251,01202
0,198006	238,18061	0,2305928	277,25727
0,226007	256,11	0,2631916	302,23936
0,31001	304,60693	0,360988	371,43379
0,394013	347,44027	0,4587844	434,32252
0,4780161	386,30901	0,5565808	492,68134
0,5060171	398,56628	0,5891796	511,32199
0,5487151	416,68256	0,6524552	546,51261

La **figura III.10** muestra las curvas esfuerzo vs deformación del Cobre C10100 modeladas por Hollomon a partir de los datos experimentales del ensayo de tracción con un R^2 de 0,9979, mientras que para los datos empíricos del ensayo de indentación el R^2 es igual a 0,9937. Se observa que los valores de $\sigma_y=20,16$ MPa y $\sigma_{ut}=416,68$ MPa del ensayo de tracción, en comparación con los de indentación ($\sigma_y=13,32$ MPa y $\sigma_{ut}=546,51$ MPa). Tanto la curva de tracción como la de indentación manifiestan un aumento del esfuerzo a medida que aumenta la deformación. Se aprecia un solapamiento entre la curva de tracción y la de indentación.

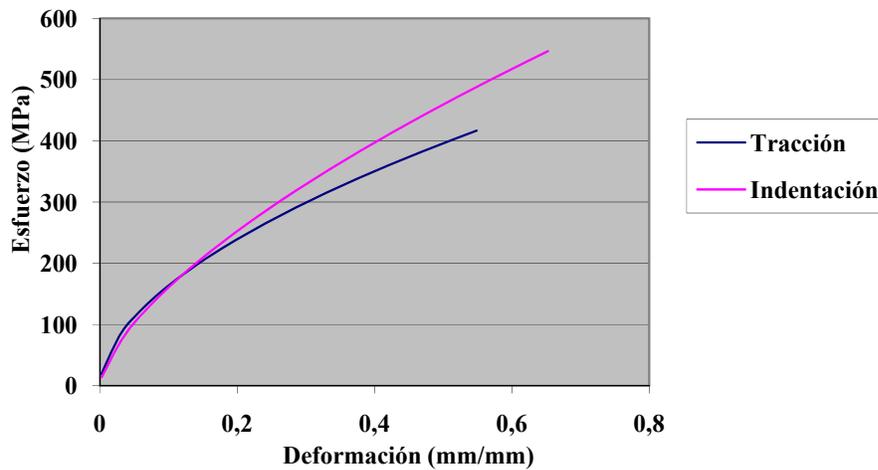


Figura III.10 Curvas esfuerzo vs deformación modeladas por Hollomon (Cobre C10100).

Tabla III.23 Propiedades mecánicas del Cobre C10100 obtenidas por Hollomon.

	Tracción	Indentación
σ_y (MPa)	20,164001	13,324393
σ_{ut} (MPa)	416,68256	546,51261

Tabla III.24 Valores de esfuerzo y deformación del ensayo de indentación y tracción (zona plástica) modeladas por Voce (Cobre C10100).

Tracción		Indentación	
ε (mm/mm)	σ(MPa)	ε (mm/mm)	σ(MPa)
0,003	36,93629	0,003	10,805653
0,003992	38,672737	0,003992	13,298645
0,0049875	40,403089	0,0049875	15,767059
0,0148886	57,377283	0,0148886	39,156501
0,0198026	65,645141	0,0198026	50,017834
0,0487902	112,37896	0,0487902	105,22212
0,0672	140,32779	0,0672	133,53592
0,0776	155,55034	0,0776	147,58582
0,0868	168,68648	0,0868	158,9703
0,1032	191,35776	0,1032	177,07946

En la **figura III.11** se observan las curvas esfuerzo vs deformación del Cobre C10100 modeladas por Voce a partir de los datos experimentales del ensayo de tracción con un R^2 de 0,9998, mientras que para los datos empíricos del ensayo de indentación el R^2 es igual a 0,9958, con lo cual se muestra un buen ajuste del modelo a los valores experimentales. Los valores de esfuerzo calculados por indentación en comparación con los de tracción, son más pequeños en todo el rango de deformaciones, es por eso que dicha curva no supera a la de tracción tal y como se observa en la figura. La curva obtenida por indentación presenta una leve concavidad y se ajusta mejor a la curva de tracción a deformaciones entre 0,04 y 0,07. Es por ello que a medida que nos acercamos a la fluencia ($\epsilon \approx 0,003$) la diferencia entre los esfuerzos va aumentando, arrojando los siguientes valores: $\sigma_y = 36,93$ MPa (tracción), $\sigma_y = 10,8$ MPa (indentación).

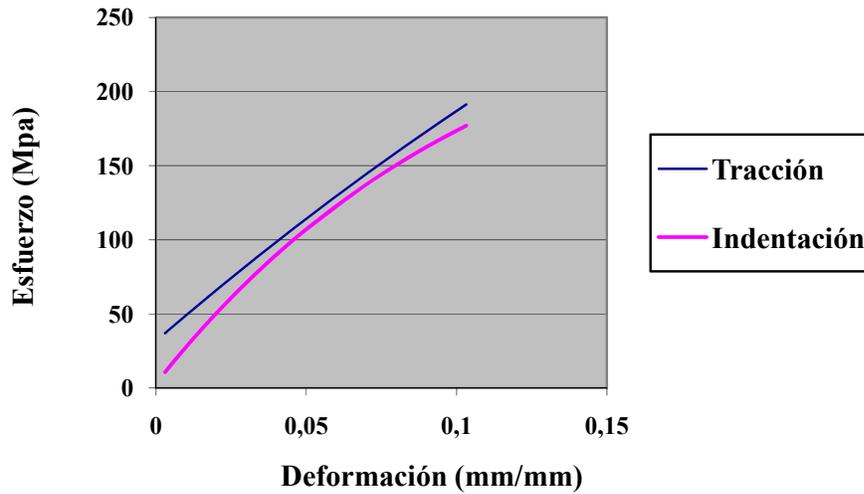


Figura III.11 Curvas esfuerzo vs deformación modeladas por Voce (Cobre C10100).

Tabla III.25 Valores de esfuerzo y deformación del ensayo de indentación y tracción (zona plástica) modeladas por Swift (Cobre C10100).

Tracción		Indentación	
ϵ (mm/mm)	σ (MPa)	ϵ (mm/mm)	σ (MPa)
0,003	35,1621	0,003	82,640864
0,003992	37,151128	0,003992	83,275053
0,0049875	39,111926	0,0049875	83,91347
0,0148886	57,513642	0,0148886	90,535508
0,0198026	66,092786	0,0198026	94,013646
0,0487902	112,35377	0,0487902	117,42708
0,0672	139,26733	0,0672	135,23966
0,0868	166,55395	0,1524	259,99418
0,094	176,29309	0,1816	325,2736
0,2508	366,15044	0,2108	406,94339

Las curvas esfuerzo vs deformación del Cobre C10100 modeladas por Swift se muestran en la figura III.12, a partir de los datos experimentales del ensayo de tracción con un R^2 de 0,9998 y de los datos empíricos del ensayo de

indentación con un R^2 igual a 0,9683. Se destaca que ambas curvas representan un buen ajuste con respecto a los valores experimentales, debido a que R^2 tiende a 1. La curva obtenida por indentación presenta un comportamiento convexo y es por eso que se observa una diferencia significativa en los valores de esfuerzo de fluencia " σ_y ", en comparación con el de tracción el cual es 35,16 MPa, mientras que para indentación es de 82,64 MPa.

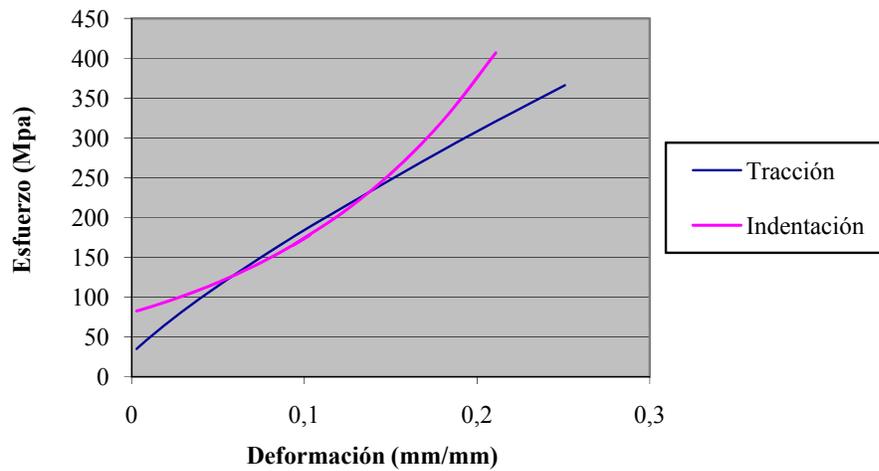


Figura III.12 Curvas esfuerzo vs deformación modeladas por Swift (Cobre C10100)

Tabla III.26 Valores de coeficiente de correlación al cuadrado para Cobre C10100.

	Hollomon R^2	Voce R^2	Swift R^2
Ensayo de Tracción	0,9979	0,9998	0,9998
Ensayo de Indentación	0,9937	0,9958	0,9683

En las tablas **III.27, 29, 30** se muestran los valores de esfuerzo y deformación, del ensayo de tracción uniaxial e indentación en el Acero AISI 4140 (Q&T), modelados por Hollomon, Voce y Swift respectivamente. En las **figuras III.13, 14, 15** se presentan gráficamente los valores antes mencionados.

Tabla III.27 Valores de esfuerzo y deformación del ensayo de indentación y tracción (zona plástica) modeladas por Hollomon (Acero AISI 4140 (Q&T)).

Tracción		Indentación	
ϵ (mm/mm)	σ(MPa)	ϵ (mm/mm)	σ(MPa)
0,005	664,95862	0,0044	505,48667
0,009	739,39323	0,009	619,93131
0,03284	934,04059	0,03284	896,77444
0,03287	934,18956	0,03287	897,00042
0,04224	977,43707	0,04224	963,48007
0,05104	1011,4044	0,05104	1016,9076
0,06064	1043,3649	0,06064	1068,1383
0,08768	1115,1784	0,09	1195,4534
0,16976	1256,4372	0,11288	1275,2284
0,17888	1268,3621	0,18152	1460,2413
0,1805163	1270,4487	0,28518908	1661,0439

En la **figura III.13** se observan las curvas esfuerzo vs deformación del Acero AISI 4140 (Q&T) modeladas por Hollomon a partir de los datos experimentales del ensayo de tracción con un R^2 de 0,9985, mientras que respecto a los datos empíricos del ensayo de indentación el R^2 es igual a 0,9188. Se nota que ambas curvas representan un buen ajuste con respecto a los valores experimentales por la tendencia de $R^2 \approx 1$. A su vez se observa que los valores de esfuerzo de fluencia y de esfuerzo real a la carga máxima del ensayo de tracción ($\sigma_y = 664,96$ MPa y $\sigma_{ut} = 1270,45$ MPa), en comparación con los de indentación ($\sigma_y = 530,02$ MPa y $\sigma_{ut} = 1557,66$ MPa) presentan una diferencia de 20% aproximadamente, por otra parte el esfuerzo crece en mayor proporción en la curva de indentación que en la de tracción, debido a que en este último el valor empírico de endurecimiento por deformación es menor.

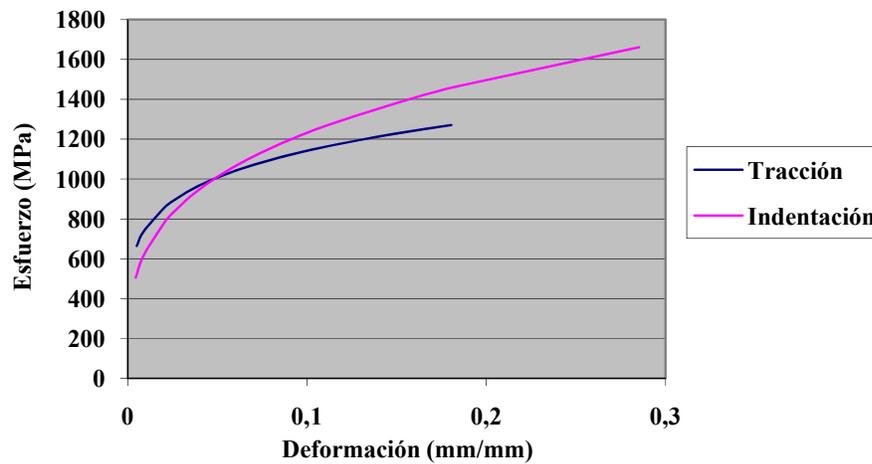


Figura III.13 Curvas esfuerzo vs deformación modeladas Hollomon (Acero AISI 4140 (Q&T)).

Tabla III.28 Propiedades mecánicas del Acero AISI 4140 (Q&T) obtenidas por Hollomon.

	Tracción	Indentación
σ_y (MPa)	664,9586	530,0263
σ_{ut} (MPa)	1270,4487	1557,6601

Tabla III.29 Valores de esfuerzo y deformación del ensayo de indentación y tracción (zona plástica) modeladas por Voce (Acero AISI 4140 (Q&T)).

Tracción		Indentación	
ϵ (mm/mm)	σ(MPa)	ϵ mm/mm)	σ(MPa)
0,005	691,78397	0,0044	295,34203
0,032438148	928,31906	0,03243815	852,82315
0,03246719	928,48779	0,03246719	853,21067
0,032525272	928,82482	0,03252527	853,98478
0,032554311	928,99313	0,03255431	854,37136
0,033047854	931,8335	0,03304785	860,89586
0,05104	1013,2571	0,06064	1117,132
0,06064	1042,9519	0,06944	1166,3446
0,06944	1064,1618	0,07856	1206,4816
0,07856	1081,4117	0,09	1244,776

En la **figura III.14** se observan las curvas esfuerzo vs deformación del Acero AISI 4140 (Q&T) modeladas por Voce a partir de los datos experimentales del ensayo de tracción con un R^2 de 0,9996, mientras que para los datos empíricos del ensayo de indentación el R^2 es igual a 0,9965. El esfuerzo de fluencia obtenidos mediante este modelo fueron los siguientes: tracción $\sigma_y = 691,78$ MPa, indentación $\sigma_y = 295,34$ MPa. Se puede apreciar que hay una diferencia significativamente importante entre estos valores. Las curvas tanto de indentación como la de tracción presentan un aumento del esfuerzo a medida que se incrementa la deformación, aunque para valores de deformación mayores a 0,08 ambas curvas tienden a buscar el estado de saturación, en donde el esfuerzo permanece constante.

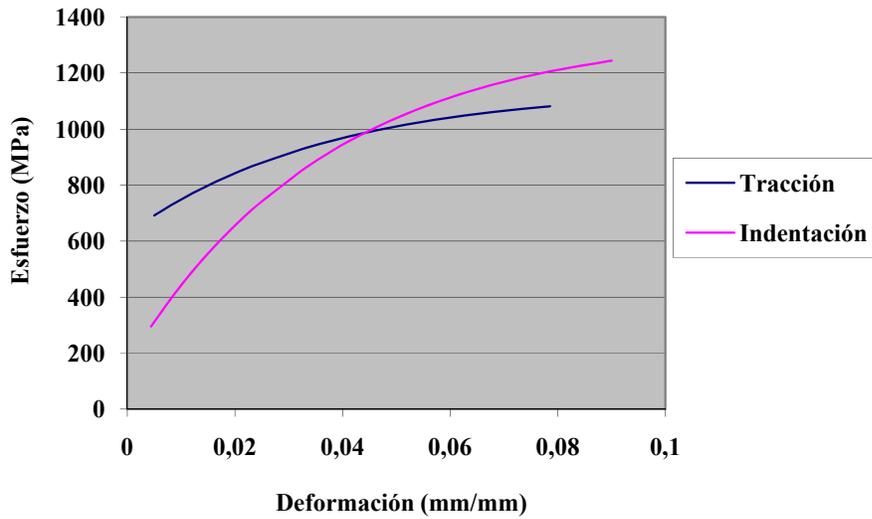


Figura III.14 Curvas esfuerzo vs deformación modeladas por Voce (Acero AISI 4140 (Q&T)).

Tabla III.30 Valores de esfuerzo y deformación del ensayo de indentación y tracción (zona plástica) modeladas por Swift (Acero AISI 4140 (Q&T)).

Tracción		Indentación	
ϵ (mm/mm)	σ (MPa)	ϵ (mm/mm)	σ (MPa)
0,005	850,9013	0,0044	456,04017
0,009	863,49392	0,009	548,40384
0,012	873,06054	0,012	600,00863
0,015	882,73314	0,015	646,92961
0,0324	941,11722	0,0324	865,0589
0,03246	941,21761	0,0324	865,3699
0,05104	1007,6603	0,06064	1122,2643
0,06064	1043,8219	0,06944	1189,6739
0,06944	1078,109	0,07856	1255,1632
0,07856	1114,8317	0,09	1332,1058

En la **figura III.15** se observan las curvas esfuerzo vs deformación del Acero AISI 4140 (Q&T) modeladas por Swift a partir de los datos experimentales del ensayo de tracción con un R^2 de 0,9898, mientras que para los datos empíricos del ensayo de indentación el R^2 es igual a 0,995. A su vez se observan los valores de esfuerzo de fluencia $\sigma_y=850,90$ MPa (tracción) y $\sigma_y=456,04$ MPa (indentación), para los cuales se muestra una diferencia del 50% aproximadamente, estos datos indican que para valores pequeños de deformación ($\epsilon < 0,02$) no se presenta un buen ajuste entre ambas curvas.

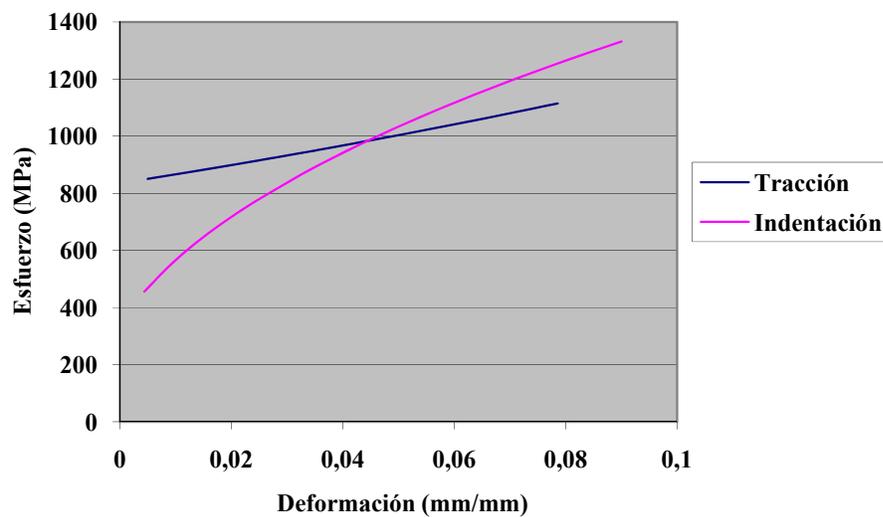


Figura III.15 Curvas esfuerzo vs deformación modeladas por Swift (Acero AISI 4140 (Q&T))

Tabla III.31 Valor de coeficiente de correlación al cuadrado (Acero AISI 4140 (Q&T)).

	Hollomon R^2	Voce R^2	Swift R^2
Ensayo de Tracción	0,9985	0,9996	0,9898
Ensayo de Indentación	0,9188	0,9965	0,9950

Los resultados demuestran que la metodología de Tabor para estimar las propiedades mecánicas para estos materiales por indentación expone resultados confiables, siempre y cuando se utilice el modelo de Hollomon y estemos trabajando para deformaciones pequeñas, en donde el material presenta endurecimiento por deformación. Partiendo de un análisis de acuerdo a la propuesta de Tabor el modelar los datos por la ecuación de Voce o por la de Swift, no arroja resultados satisfactorios, a pesar que es bien conocido que el modelo de Voce es un modelo más elaborado que los otros utilizados en la presente investigación.

3.4 SISTEMA SUSTRATO/RECUBRIMIENTO.

En la **tabla III.32** se especifican los valores de elongación y carga obtenidos a partir del ensayo de tracción uniaxial, de las probetas de Acero 4140 recubiertas con Colmonoy 88 para cada uno de los espesores. En la **tabla III.33** se muestran los valores de carga aplicada en el ensayo de indentación al Acero 4140 (sustrato) y al compuesto Acero AISI 4140 (Q&T)/Colmono88, con el respectivo valor de dureza Brinell y de profundidad relativa de indentación (RID). En la **tabla III.34** se exponen los valores de dureza Brinell del Colmonoy 88 (recubrimiento) calculados a través del modelo de Lesage and Pertuz[16].

Tabla III.32 Valores del ensayo de tracción para las probetas de Acero AISI 4140 (Q&T) recubiertas con Colmonoy 88.

espesor 0,2mm		espesor 0,4mm		espesor 0,6mm	
Elongación (mm/mm)	Carga (N)	Elongación (mm/mm)	Carga (N)	Elongación (mm/mm)	Carga (N)
4,074	47871	3,627	48269,5	3,647	46344
4,414	48250,5	4,32	48827	4,056	46778
4,877	48554,5	4,775	49350	4,451	47200
5,342	48935,5	5,436	50055	4,841	47607
5,943	49358,5	6	50583,5	5,291	48162,5
6,415	49678,5	6,643	50996,5	5,662	48595
6,97	50026	7,271	51228	6,062	49007
7,356	50133,5	7,556	51282	6,461	49353,5
7,489	50150,5	7,8	51303	6,87	49636
				7,264	49806,5
				7,663	49939,5
				8,063	49985,5

En la **figura III.16** se muestran las curvas carga vs elongación del ensayo de tracción uniaxial para las probetas con y sin recubrimiento. En ella no se observa una diferencia importante entre las curvas del Acero (sin recubrimiento) y las curvas de las probetas recubiertas, ya que en el ensayo de tracción el recubrimiento se fracturó primero que el sustrato, esto pudo ser causado por una mala adherencia del recubrimiento o por la diferencia de ductilidad entre los materiales. Además la carga máxima para el Acero s/rec es 52341 N, mientras que para las probetas recubiertas fue: 50150,5 N (e= 0,2mm), 51303 N (e= 0,4mm), 49985,5 N (e= 0,6mm), lo que muestra un variación insignificante entre los valores. Por consiguiente, estos resultados no permiten afirmar la influencia del recubrimiento sobre las propiedades mecánicas del material.

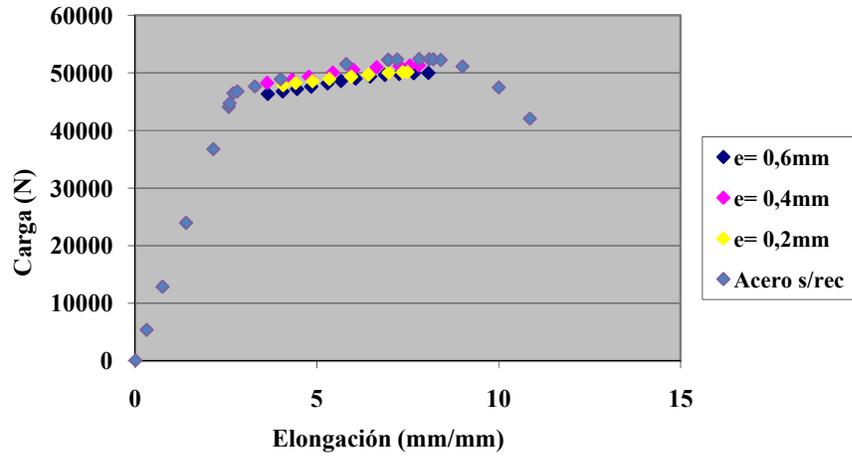


Figura III.16 Curva carga vs elongación probetas recubiertas y probeta de Acero AISI 4140 (Q&T)

Tabla III.33 Valores de dureza Brinell del sustrato “Hs” (Acero AISI 4140 (Q&T)), del sistema sustrato/recubrimiento “Hc” (Acero AISI 4140 (Q&T)/Colmonoy88) y profundidad relativa de indentación “RID”.

Carga (Kgf)	Sustrato Hs (Kgf/mm ²)	Sustrato/recubrimiento					
		0,6mm	0,4mm	0,2mm	0,6mm	0,4mm	0,2mm
		Hc (Kgf/mm ²)			RID (mm/mm)		
250,00	351,54	470,08	417,25	337,00	0,11	0,19	0,47
187,50	337,09	475,15	429,16	339,52	0,08	0,14	0,35
150,00	325,87	481,16	460,94	385,71	0,07	0,10	0,25
125,00	316,77	489,19	477,73	398,80	0,05	0,08	0,20
100,00	305,76	494,11	490,84	431,49	0,04	0,06	0,15

En la figura III.17 muestran los valores de dureza Brinell obtenidos mediante los ensayos de indentación de la probeta de Acero AISI 4140 (Q&T)

(sustrato) y las probetas recubiertas con Colmonoy 88 con tres espesores diferentes ($e= 0,2\text{mm}; 0,4\text{mm}; 0,6\text{mm}$). Para 100 Kgf (mínima carga aplicada) la HB del compuesto (sustrato/rec) es de 494 para 0,6mm de espesor de recubrimiento, 490 para 0,4mm y 431 para 0,2mm. Mientras que para 250 Kgf (máxima carga aplicada) la HB es de 470 para 0,6mm, 417 para 0,4mm y 337 para 0,2mm. Sabiendo que el valor de dureza Brinell teórico del Acero 4140 Q&T (sustrato) es 300[10] y del Colmonoy 88 es 409-496[26], El comportamiento o tendencia que se aprecia en la figura parece indicar que en la medida que la carga aumenta el valor de dureza compuesta disminuye, comportamiento que podríamos explicar en términos del tamaño relativo de la indentación a mayor carga se espera una mayor impronta y por ende esperaría que el sustrato tuviese un mayor aporte al valor de la propiedad, caso contrario en la medida que la profundidad relativa de indentación es menor (menores cargas aplicadas), prevalecerá el valor de la propiedad del recubrimiento. Este razonamiento es aplicable al valor puntual de la propiedad para una carga en particular cuando se varía el espesor. En este caso podemos ver como en la medida que el espesor disminuye el aporte del sustrato será mayor. Finalmente, encontramos que la tendencia anteriormente expuesta y la cual es válida para los tres espesores de la película no se cumple del todo para el sustrato como tal, en este caso el comportamiento pareciera ser diferente, aquí no tomando en cuenta la desviación estándar presente en la determinación del promedio que se expone para cada propiedad se podría decir que, en la medida que la carga es mayor se presenta una mayor deformación y por ende el material puede experimentar endurecimiento por deformación durante la realización del ensayo, lo cual podría explicar esta tendencia, no obstante al no tener datos de la tasa de deformación, sería prudente tener reservas sobre este argumento, por otra parte al ser tan discreto el cambio de la propiedad con la carga, también podría atribuirse este comportamiento al valor de dispersión en los datos.

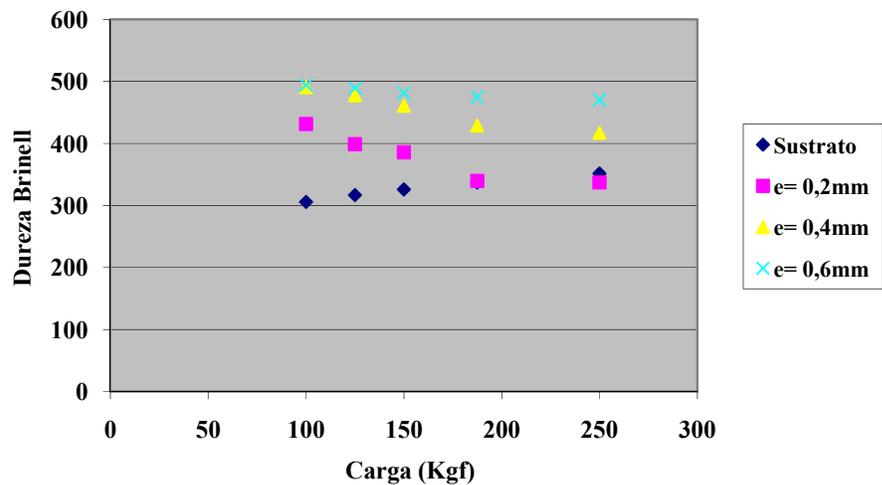


Figura III.17 Valores de Dureza compuesta vs Carga

En un estudio preliminar se adaptó el modelo de Korsunsky [16] para estimar la dureza de capas delgadas por indentación Vickers para obtener la dureza del recubrimiento. Los valores de dureza del recubrimiento calculados fueron aproximados al valor teórico, sin embargo este modelo no permite calcular el cambio de esta propiedad con el diámetro de la huella [15].

En la **tabla III.34** se muestran los valores de dureza del recubrimiento obtenidos mediante la adaptación del modelo de Lesage-Pertuz[16] aplicado a los valores de indentación de cada espesor. En ella se observa como a medida que aumenta la carga, el “Hf” aumenta solo para el caso de 0,6mm de espesor, mientras que por el contrario para los espesores de 0,4 mm y 0,2 mm la “Hf” disminuye. Esta tendencia parece indicar que para el espesor de 0,2 mm y 0,4 mm los valores de dureza registrados están siendo influenciados aun por el sustrato o la adaptación del modelo no funciona. En cambio que para el espesor de 0,6 mm se registran valores alentadores.

Tabla III.34 Valores de dureza Brinell del recubrimiento obtenidos utilizando el modelo de Lesage-Pertuz.

	Espesor de recubrimiento (mm)		
	0,6	0,4	0,2
Carga (Kgf)	Dureza Brinell del recubrimiento "Hf" (Kgf/mm ²)		
250	491,316546	458,122488	314,33872
187,5	487,232682	473,166649	343,049557
150	484,520946	508,545589	472,937517
125	484,228599	519,599809	508,408942
100	478,899232	520,566575	577,707283

Tabla III.35 Valores de esfuerzo y deformación del Colmonoy 88.

ϵ (mm/mm)	σ (MPa)
0,01044	1439,096
0,012	1457,1117
0,016	1495,0451
0,026	1561,3166
0,032	1590,5487
0,034	1599,1863
0,046	1642,9598
0,084	1733,7643
0,086	1737,4127
0,0893355	1743,3288

En la **figura III.18** se observa la curva esfuerzo vs deformación (zona plástica) del Colmonoy 88 modelada por Hollomon. El punto de fluencia σ_y es 1439,096 y el esfuerzo real a la carga máxima es σ_{ut} es 1743,33.

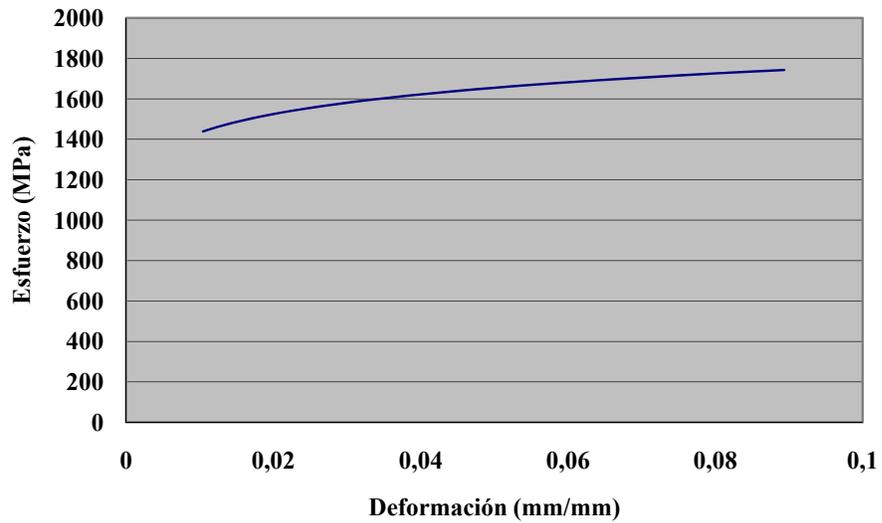


Figura III.18 Curvas esfuerzo real deformación real del Colmonoy 88 modelada por Hollomon

CAPÍTULO IV: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

Conclusiones

- La deposición del recubrimiento sobre las probetas de tracción no mostró una diferencia notable en los valores de carga máxima.
- El trabajo de Tabor muestra una buena aproximación para estimar las curvas de esfuerzo vs deformación en la zona plástica de los materiales utilizados en la presente investigación, obtenidas por un ensayo de tracción uniaxial.
- El valor del coeficiente de Tabor puede variar entre 2,89 y 3,08.
- Las relaciones empíricas de Tabor muestran una buena aproximación del comportamiento de las curvas esfuerzo vs deformación modelado por Hollomon[19] para pequeñas deformaciones.
- Mediante la indentación Brinell se logra construir la curva esfuerzo vs deformación para un recubrimiento grueso.
- Es válido extrapolar el modelo de Lesage-Pertuz[16] a indentación Brinell para un material recubierto con un espesor de 0,6mm de Colmonoy 88.

Recomendaciones

- Continuar el estudio de las propiedades mecánicas de un recubrimiento a través del ensayo de indentación Vickers, debido a que el modelo de Lesage-Pertuz fue construido para ese tipo de ensayo en específico.
- Para lograr construir la curva esfuerzo vs deformación de un recubrimiento es recomendable utilizar un espesor mayor a 0,6mm.
- Conocer las variables del proceso de deposición del recubrimiento con el fin de observar la influencia de las mismas sobre el conjunto substrato-recubrimiento.
- Desarrollar otras metodologías para estimar las propiedades

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Askeland, Donald y Phulé, Prardeep. 2004. *“Ciencia e Ingeniería de los Materiales”* Editorial Thompson. Cuarta Edición. Madrid-España.
2. ASM Handbook, 1990 *“Properties And Selection: Nonferrous Alloys And Special-Purpose Materials”*. ASM Internacional. Decima Edición. Vol 2.
3. ASM Handbook, 1994. *“Surface Engineering”*. Editorial Materials Park. Vol 5. Pag 498-507.
4. ASTM E10-07a *“Standard Test Method for Brinell Hardness of Metallic Materials”* American Association State Highway and Transportation Officials Standard AASHTO No.: T70-86.
5. ASTM E376-69. 1974 *“Standart Recomendmed Pratice For Measuring Coating Thickness by magnetic field or eddy current (electromagnetic) Test methods.*
6. ASTM. A-370-77. 1973. *“Standard Method, And Definition For Mechanical Testing Of Steel Products”*
7. Avner, Sydney H. 1988. *“Introducción a la metalúrgica física”*. Editorial McGRAW-HILL. Segunda Edición.
8. Carrasquero, Edwuin J. 1999. *“Caracterización Microestructural y Tribológica de un Revestimiento Industrial de WC-Co obtenido por deposición vía HVOF”*.
9. Dieter E., George. 1976. *Mechanical Metalulurgy* Segunda Edición, Editorial McGRAW-HILL.
10. Ferrum Aceros C.A. 2005. Editorial Bohler Uddeholm.

11. Fischer-Cripps, Anthony. 2007 *“Introduction to Contact Mechanics”*, Editorial Springer, Segunda edición. New South Wales, Australia
12. Girish Shastry C., M.D. Mathew, K. Bhanu Sankara Rao*, S.L. Mannan. 2003. *“Analysis of elevated temperature flow and work hardening behaviour of service-exposed 2.25Cr-1Mo steel using Voce equation”*.
13. Jeong-Hoon Ahn Eun-chae Jeon, Yeol Choi. 2001 *“Derivation of tensile flow properties of thin films using nanoindentation technique”*.
14. Kang, Yao, Barbero. *“Post-yielding Stress-Strain Determination Using Spherical Indentation”*.
15. Lamovec-Jovic-Trifunovic-Aleksic-Radojevic. *“Hardness Response of Different Composite Systems with Fine-Grained Nickel Electrodeposited Films”*.
16. Lesage-Pertuz. 2005. *“A model to determine surface hardness of thin films from standard micro-indentation test”*.
17. Mata M., Anglada M. y Alcalá J. *“Medición in situ de propiedades mecánicas mediante Micro-indentación instrumentalizada”*.
18. Mangonon, Pat L. 2001 *“Ciencia de los Materiales (Selección y Diseño)”*. Editorial Parson Educación. Primera Edición. Mexico.
19. Martínez, Hader V. 2007. *“Simulación numérica del contacto deslizante para el sistema 2117-T4/X19CrNi17.2 en compresión”*
20. Oliveira, F.; Hernandez, F; Villalobos, C. 2001 *“Corrosion-fatigue properties of 4340 steel coated with Colomonoy 88 alloy, applied by HVOF thermal spray”*. *Surface & Coatings Technology*.
21. Peña, Hugo. 2006 *“Indentación Knoop – Vickers de recubrimientos delgados”*.

22. Pereira, D; Gonzales C. 2004 *“Manual de corriente inducida nivel II. Editado por Instituto Tecnológico”*.
23. SAE Technical Paper Series. 1992. *“Higher Velocity Thermal Spray Processes Produce Better Aircraft Engine Coating”*
24. Tabor, D. 1951. *“Hardness of Metals”*, Clarendon Press, Oxford
25. UCV, *Aleaciones no ferreas. Aluminio Serie 6000*.
26. <http://www.matweb.com>. Consultado: Agosto 2007