



ESPE
UNIVERSIDAD DE LAS FUERZAS ARMADAS
INNOVACIÓN PARA LA EXCELENCIA

Estudio de la dureza del aluminio, latón y acero dulce utilizando laboratorios virtuales y software CAD bajo normas internacionales.

Vasquez Mesías, Franklin Jefferson

Departamento de Ciencias de la Energía y Mecánica

Carrera de Ingeniería Automotriz

Trabajo de Unidad de Integración Curricular, previo a la obtención del Título de Ingeniero Automotriz

Ing. Carvajal Naranjo, Miguel Alberto

04 de febrero del 2022

Latacunga



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA CARRERA
DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ**

Certificación

Certifico que el trabajo de Unidad de Integración Curricular, **“Estudio de la dureza del aluminio, latón y acero dulce utilizando laboratorios virtuales y software CAD bajo normas internacionales”** fue realizado por el señor **Vasquez Mesías, Franklin Jefferson** el mismo que ha sido revisado en su totalidad, analizado por la herramienta de verificación de similitud de contenido; por lo tanto, cumple con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, razón por la cual me permito acreditar y autorizar para que lo sustente públicamente.

Latacunga, 04 de febrero del 2022



Firmado electrónicamente por:
**MIGUEL ALBERTO
CARVAJAL NARANJO**

Ing. Carvajal Naranjo, Miguel Alberto

C.C.:1801711936

Reporte de verificación de contenido



Trabajo de UIC-VASQUEZ FRANKLIN.docx
Scanned on: 20:10 January 31, 2022 UTC



Overall Similarity Score



Results Found



Total Words in Text



Firmado electrónicamente por:
**MIGUEL ALBERTO
CARVAJAL NARANJO**

Ing. Carvajal Naranjo, Miguel Alberto

C.C.:1801711936



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Responsabilidad de autoría

Yo, **Vásquez Mesías, Franklin Jefferson** con cedula de ciudadanía N°**1751286327**, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de Unidad de Integración Curricular: **“Estudio de la dureza del aluminio, latón y acero dulce utilizando laboratorios virtuales y software CAD bajo normas internacionales”** es de mi autoría y responsabilidad, cumpliendo con los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, respetando los derechos intelectuales de terceros y referenciando las citas bibliográficas.

Latacunga, 04 de febrero del 2022



Vasquez Mesías, Franklin Jefferson

C.C:1751286327



DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA Y MECÁNICA
CARRERA DE INGENIERÍA AUTOMOTRIZ

Autorización de publicación

Yo, **Vasquez Mesías, Franklin Jefferson** con cedula de ciudadanía N° **1751286327**, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de Unidad de Integración Curricular: **“Estudio de la dureza del aluminio, latón y acero dulce utilizando laboratorios virtuales y software cad bajo normas internacionales”** en el Repositorio Institucional, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra responsabilidad.

Latacunga, 04 de febrero del 2022

Vasquez Mesías, Franklin Jefferson

C.C:1751286327

Dedicatoria

Dedico este trabajo de titulación, el esfuerzo y constancia empleados, a mis padres Danilo Vasquez y Shicett Mesías por permitirme cumplir una meta tan anhelada, por apoyarme incondicionalmente y siempre darme palabras de aliento y darme la felicidad de cumplir esta meta, a mis compañeros de universidad especialmente a mis amigos Jorge y Mauro que me acompañaron en momentos difíciles, de juerga y de aprendizaje durante mi carrera universitaria.

A mi abuelita que es mi ángel Mariana del Pozo que ahora está con Dios ya siempre tuvo el deseo de verme como un profesional.

Agradecimiento

El apoyo y motivación que me dieron mis padres en esta etapa de mi vida fue indispensable para la culminación de este objetivo, a mi madre Shicett Mesías por siempre preocuparse por mí y brindarme su amor. A mi padre Danilo Vasquez por cada consejo de vida que me supo dar, gracias a eso llegue a ser la persona que ahora soy.

Gracias a todos los que me apoyaron de alguna manera, a mis compañeros de universidad que me ayudaron en momentos que me resultaban difíciles durante la carrera, por motivarme a no rendirme y dar lo último hasta el final.

Gracias a la Universidad de las Fuerzas Armadas por permitirme formarme en sus aulas, en especial a mi tutor de tesis el Ing. Miguel Carvajal por guiarme y asesorarme en este proyecto.

Tabla de contenidos

Caratula.....	1
Certificación.....	2
Reporte de verificación de contenido.....	3
Responsabilidad de autoría.....	4
Autorización de publicación.....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento.....	7
Tabla de contenidos.....	8
Indice de figuras.....	13
Indice de tablas.....	17
Resumen.....	20
Abstract.....	21
Generalidades.....	22
Antecedentes.....	22
Planteamiento del problema.....	23
Justificación e Importancia.....	23
Objetivos.....	26
<i>Objetivo General.....</i>	26
<i>Objetivos específicos.....</i>	26
Hipótesis.....	26
Variables de investigación.....	26

<i>Variables independientes</i>	26
<i>Variables dependientes</i>	26
Marco teórico	27
Definición de laboratorio virtual.....	27
<i>Praxilabs</i>	27
<i>Algetec</i>	28
<i>Virtual Labs</i>	28
Software CAD.....	29
<i>Inventor</i>	30
<i>Ansys</i>	30
<i>Solidworks</i>	31
Durómetro.....	31
<i>Definición de durómetro</i>	31
<i>Principio de Funcionamiento</i>	32
<i>Partes del durómetro</i>	32
Ensayos de Dureza.....	33
<i>Ensayo de Dureza Rockwell</i>	34
<i>Ensayo de Dureza Brinell</i>	34
<i>Ensayo de Dureza Vickers</i>	35
Normativas.....	36
<i>Astm_e10-15</i>	36
Indentadores.....	36
Tiempo.....	38
Formula de Dureza Brinell.....	39
Pieza de Prueba.....	39

Carga.....	41
<i>Astm_e18-15.....</i>	<i>43</i>
Indentadores.....	43
Tiempo.....	46
Cálculo de la dureza Rockwell.....	47
Cargas.....	48
Piezas de Prueba.....	50
<i>Astm_e92-17.....</i>	<i>52</i>
Indentadores.....	52
Tiempo.....	54
Cálculo de dureza Vickers.....	55
Pieza de Prueba.....	55
Cargas.....	55
Metodología de desarrollo del proyecto.....	58
Laboratorio Virtual.....	58
<i>Ensayo de Dureza Rockwell.....</i>	<i>58</i>
Paso 1.....	58
Paso 2.....	58
Paso 3.....	59
Paso 4.....	60
Paso 5.....	63
<i>Ensayo de Dureza Brinell.....</i>	<i>65</i>
Paso 1.....	65
Paso 2.....	66
Paso 3.....	66

Paso 4.....	67
Paso 5.....	67
Paso 6.....	68
Paso 7.....	70
<i>Ensayo de Dureza Vickers.....</i>	<i>72</i>
Paso 1.....	72
Paso 2.....	73
Paso 3.....	73
Paso 4.....	74
Paso 5.....	75
Paso 6.....	76
Paso 7.....	76
Paso 8.....	78
Paso 9.....	80
Software CAD.....	83
<i>Simulación ensayo de dureza Brinell.....</i>	<i>83</i>
Paso 1.....	83
Paso 2.....	84
Paso 3.....	86
Paso 4.....	86
Paso 5.....	88
Paso 6.....	90
<i>Simulación ensayo de dureza Rockwell.....</i>	<i>91</i>
Paso 1.....	91
Paso 2.....	91
Paso 3.....	92

Paso 4.	93
Paso 5.	94
Paso 6.	98
<i>Simulación ensayo de dureza Vickers.....</i>	<i>99</i>
Paso 1	99
Paso 2.	99
Paso 3.	100
Paso 4.	101
Paso 5.	103
Paso 6.	107
Resultados y discusión.....	109
Datos obtenidos en laboratorio virtual.....	109
<i>Verificación de datos Obtenidos.....</i>	<i>109</i>
Datos Obtenidos en Software CAD.....	113
Análisis de resultados.....	114
<i>Análisis entre laboratorios virtuales y software CAD....</i>	<i>114</i>
<i>Análisis entre laboratorios virtuales y valores calculados mediante fórmulas.....</i>	<i>116</i>
Conclusiones y recomendaciones.....	119
Conclusiones.....	119
Recomendaciones.....	120
Bibliografía.....	121

Índice de figuras

Figura 1 Laboratorio virtual de ensayo de dureza.....	28
Figura 2 Durómetro.....	32
Figura 3 Partes del durómetro.....	33
Figura 4 Ensayo de dureza rockwell.....	34
Figura 5 Ensayo de dureza brinell.....	35
Figura 6 Ensayo de dureza vickers.....	36
Figura 7 Indentadores de bolas de carburo de tungsteno.....	36
Figura 8 Indentadores de bola y esfero cónicos.....	43
Figura 9 Diferencias de las medidas de profundidad.....	47
Figura 10 Indentadores de diamante piramidal de base cuadrada.....	52
Figura 11 Penetrador vickers.....	54
Figura 12 Penetrador vickers empleado en virtual labs.....	54
Figura 13 Materiales de prueba ensayo rockwell.....	58
Figura 14 Indentador del ensayo rockwell.....	59
Figura 15 Pre aplicación de carga preliminar.....	59
Figura 16 Aplicación de carga preliminar.....	60
Figura 17 Pre selección de carga principal.....	60
Figura 18 Selección de carga principal.....	61
Figura 19 Tiempo de aplicación de carga principal.....	61
Figura 20 Dureza del acero dulce.....	62

Figura 21 <i>Dureza del latón</i>	62
Figura 22 <i>Dureza del alumini</i>	63
Figura 23 <i>Selección de materiales</i>	66
Figura 24 <i>Muestra en posición</i>	67
Figura 25 <i>Aplicación de carga</i>	68
Figura 26 <i>Tiempo de aplicación de carga</i>	68
Figura 27 <i>Diámetro de impresión acero dulce</i>	69
Figura 28 <i>Diámetro de impresión latón</i>	69
Figura 29 <i>Diámetro de impresión aluminio</i>	69
Figura 30 <i>Selección de materiales</i>	73
Figura 31 <i>Regulación de altura del material</i>	74
Figura 32 <i>Ajuste de la carga a ejercer en el aluminio</i>	74
Figura 33 <i>Ajuste de la carga a ejercer en el latón</i>	75
Figura 34 <i>Ajuste de la carga a ejercer en el acero dulce</i>	75
Figura 35 <i>Tiempo de aplicación de carga</i>	76
Figura 36 <i>Aplicación de la carga</i>	76
Figura 37 <i>Medición de la impresión en x para el acero dulce</i>	77
Figura 38 <i>Medición de la impresión en x para el latón</i>	77
Figura 39 <i>Medición de la impresión en x para el aluminio</i>	78
Figura 40 <i>Medición de la impresión en y para el acero dulce</i>	78
Figura 41 <i>Medición de la impresión en y para el latón</i>	79

Figura 42 <i>Medición de la impresión en y para el aluminio.....</i>	79
Figura 43 <i>Indentador y probeta ensayo brinell.....</i>	84
Figura 44 <i>Materiales para probetas e indentadores.....</i>	86
Figura 45 <i>Malla generada ensayo brinell.....</i>	86
Figura 46 <i>Soporte fijo de la probeta.....</i>	87
Figura 47 <i>Fuerza aplicada al aluminio.....</i>	87
Figura 48 <i>Fuerza aplicada al latón.....</i>	88
Figura 49 <i>Fuerza aplicada al acero dulce.....</i>	88
Figura 50 <i>Diámetro de indentación en aluminio.....</i>	89
Figura 51 <i>Diámetro de indentación en latón.....</i>	89
Figura 52 <i>Diámetro de indentación en acero dulce.....</i>	90
Figura 53 <i>Indentador y probeta ensayo rockwell.....</i>	91
Figura 54 <i>Materiales para probetas e indentadores.....</i>	92
Figura 55 <i>Malla generada ensayo rockwell.....</i>	93
Figura 56 <i>Soporte fijo de la probeta.....</i>	93
Figura 57 <i>Fuerza preliminar aplicada a las probetas.....</i>	94
Figura 58 <i>Fuerza total aplicada a las probetas.....</i>	94
Figura 59 <i>Deformación superficial probeta de aluminio.....</i>	95
Figura 60 <i>Deformación superficial probeta de latón.....</i>	95
Figura 61 <i>Deformación superficial probeta de acero dulce.....</i>	96
Figura 62 <i>Deformación total probeta de aluminio.....</i>	96

Figura 63 <i>Deformación total probeta de latón.....</i>	97
Figura 64 <i>Deformación total probeta de acero dulce.....</i>	97
Figura 65 <i>Indentador y probeta ensayo vickers.....</i>	99
Figura 66 <i>Materiales para probetas e indentadores.....</i>	100
Figura 68 <i>Soporte fijo de la probeta.....</i>	102
Figura 69 <i>Fuerza aplicada al aluminio.....</i>	102
Figura 70 <i>Fuerza aplicada al latón.....</i>	102
Figura 71 <i>Fuerza aplicada al acero dulce.....</i>	103
Figura 72 <i>Longitud de diagonal respecto al eje x del aluminio.....</i>	104
Figura 73 <i>Longitud de diagonal respecto al eje x del latón.....</i>	104
Figura 74 <i>Longitud de diagonal respecto al eje x del acero dulce.....</i>	105
Figura 75 <i>Longitud de diagonal respecto al eje z del aluminio.....</i>	105
Figura 76 <i>Longitud de diagonal respecto al eje z del latón.....</i>	106
Figura 77 <i>Longitud de diagonal respecto al eje z del acero dulce.....</i>	106

Índice de tablas

Tabla 1 <i>Escalas de dureza brinell.....</i>	37
Tabla 2 <i>Tiempo en ensayo brinell.....</i>	39
Tabla 3 <i>Espesor de la probeta en función de 10 veces la indentación.....</i>	40
Tabla 4 <i>Diámetro de indentadores.....</i>	41
Tabla 5 <i>Carga dependiendo del material a ensayar.....</i>	42
Tabla 6 <i>Diámetro de indentadores.....</i>	44
Tabla 7 <i>Indentadores dependiendo del material a ensayar.....</i>	46
Tabla 8 <i>Tiempos de tolerancia de los ciclos.....</i>	46
Tabla 9 <i>Fuerza aplicada dependiendo del indentador y la escala.....</i>	48
Tabla 10 <i>Fuerza aplicada dependiendo del material.....</i>	49
Tabla 11 <i>Espesor de las probetas con penetrador de bola de 1/16 in.....</i>	50
Tabla 12 <i>Espesor de las probetas con penetrador de diamante.....</i>	51
Tabla 13 <i>Indentador vickers.....</i>	53
Tabla 14 <i>Espesores mínimos para el ensayo de dureza vickers.....</i>	55
Tabla 15 <i>Escalas de dureza estándar y fuerza de prueba.....</i>	56
Tabla 16 <i>Carga dependiendo del material a ensayar.....</i>	57
Tabla 17 <i>Dureza del acero dulce en escala c.....</i>	63
Tabla 18 <i>Dureza del latón en escala c.....</i>	63
Tabla 19 <i>Dureza del aluminio en escala c.....</i>	64
Tabla 20 <i>Valor promedio de dureza del acero dulce.....</i>	64

Tabla 21 <i>Valor promedio de dureza del latón.....</i>	65
Tabla 22 <i>Valor promedio de dureza del aluminio.....</i>	65
Tabla 23 <i>Carga dependiendo del material a ensayar.....</i>	66
Tabla 24 <i>Dureza del acero dulce en escala brinell.....</i>	70
Tabla 25 <i>Dureza del latón en escala brinell.....</i>	70
Tabla 26 <i>Dureza del aluminio en escala brinell.....</i>	70
Tabla 27 <i>Valor promedio de dureza del acero dulce en escala brinell.....</i>	71
Tabla 28 <i>Valor promedio de dureza del latón en escala brinell.....</i>	71
Tabla 29 <i>Valor promedio de dureza del aluminio en escala brinell.....</i>	72
Tabla 30 <i>Carga dependiendo del material a ensayar.....</i>	73
Tabla 31 <i>Valores de dureza.....</i>	83
Tabla 32 <i>Dureza del acero dulce ensayo vickers.....</i>	80
Tabla 33 <i>Dureza del latón ensayo vickers.....</i>	81
Tabla 34 <i>Dureza del aluminio ensayo vickers.....</i>	81
Tabla 35 <i>Valor promedio de dureza del acero dulce ensayo vickers.....</i>	85
Tabla 36 <i>Valor promedio de dureza del latón ensayo vickers.....</i>	85
Tabla 37 <i>Valor promedio de dureza del aluminio ensayo vickers.....</i>	82
Tabla 38 <i>Propiedades mecánicas de materiales.....</i>	84
Tabla 39 <i>Profundidad de indentación ensayo rockwell.....</i>	99
Tabla 40 <i>Profundidad de indentación ensayo vickers.....</i>	107
Tabla 41 <i>Valores de dureza totales.....</i>	110

Tabla 42 <i>Valores de dureza obtenidos</i>	113
Tabla 43 <i>Porcentajes de error</i>	114
Tabla 44 <i>Análisis de porcentajes de error</i>	117

Resumen

El presente trabajo se orientó en la obtención de la dureza Brinell, Rockwell y Vickers enfocándose principalmente en materiales de aluminio, latón y acero dulce. La obtención de la dureza se lo realizó mediante el laboratorio virtual Virtual Labs y el software de análisis de elementos finitos ANSYS. Para la realización de los ensayos de dureza se tomó en cuenta parámetros de normas internacionales ASTM, tomando de las normas los indentadores, tiempo, fórmula para obtener el valor de dureza del material, parámetros para la pieza de prueba y las cargas aplicadas para el desarrollo de cada ensayo específicamente, luego de realizar los ensayos se obtuvieron porcentajes de error entre valores obtenidos en el laboratorio virtual y mediante la aplicación de fórmulas para observar la diferencia entre estos valores, de la misma manera se obtuvieron porcentajes de error entre valores obtenidos en el laboratorio virtual y el software ANSYS para observar la diferencia entre estos valores, el análisis en el software ANSYS se lo realizó mediante diámetros, profundidades y diagonales de indentación proporcionados por el software ANSYS, el análisis en el laboratorio virtual se lo realizó con diámetros y diagonales de indentación encontrando como limitación el análisis en el ensayo de dureza Rockwell por características del propio laboratorio virtual ya que no proporciona profundidades de indentación para realizar un análisis mediante la aplicación de fórmulas.

Palabras clave:

- **ANSYS**
- **DUREZA BRINELL**
- **DUREZA ROCKWELL**
- **DUREZA VICKERS**
- **LABORATORIO VIRTUAL**

Abstract

The present work was oriented towards obtaining the Brinell, Rockwell and Vickers hardness, focusing mainly on aluminum, brass and mild steel materials. Hardness was obtained using the Virtual Labs virtual laboratory and the ANSYS finite element analysis software. To carry out the hardness tests, parameters of international ASTM standards were taken into account, taking from the standards the indenters, time, formula to obtain the hardness value of the material, parameters for the test piece and the loads applied for the development. of each test specifically, after carrying out the tests, error percentages were obtained between values obtained in the virtual laboratory and by applying formulas to observe the difference between these values, in the same way error percentages were obtained between values obtained in the virtual laboratory. virtual laboratory and the ANSYS software to observe the difference between these values, the analysis in the ANSYS software was carried out using diameters, depths and indentation diagonals provided by the ANSYS software, the analysis in the virtual laboratory was carried out with diameters and diagonals of indentation finding as a limitation the analysis in the Rockwell hardness test ell due to the characteristics of the virtual laboratory itself since it does not provide indentation depths to carry out an analysis by applying formulas.

Keywords:

- **ANSYS**
- **HARDNESS BRINELL**
- **HARDNESS ROCKWELL**
- **HARDNESS VICKERS**
- **VIRTUAL LABORATORY**

Capítulo I

1. Generalidades

1.1. Antecedentes

Desde finales del 2019, el mundo se ha enfrentado a una pandemia causada por COVID-19 (Coronavirus), que tiene a todas las personas en un total aislamiento suspendiendo toda actividad presencial y luego a un confinamiento parcial, así las personas han tenido que realizar teletrabajo como es el caso de la educación virtual. (Salazar, 2020)

Los laboratorios virtuales pueden llegar a las universidades en temas de investigación, con diferentes variedades de ensayos y aplicaciones, las cuales pueden ser realizadas una y otra vez sin causar los problemas de los laboratorios tradicionales, (falta de espacio, probetas y una variedad de máquinas limitados, sin mantenimiento o descontinuados).

El sector educativo siendo un grupo vulnerable, ha tenido que adaptarse a plataformas como zoom o meet, sin embargo, en carreras de ingeniería como técnicas se requiere el uso de laboratorios virtuales, de esta manera los estudiantes pueden familiarizarse con la parte teórica que involucra este tipo de actividades. (Salazar, 2020)

Existen diversos softwares CAD para la aplicación de ensayos mecánicos como puede ser el inventor, solidWorks, ansys entre otros, en el presente trabajo se enfocará en el software ansys se pueden generar ensayos mecánicos los cuales proporcionan información sobre el esfuerzo y la ductilidad de los materiales, dicha información se puede emplear para comparar materiales, perfeccionar aleaciones, control de las características en los materiales. (Cristel & Arlyn, 2016)

En la actualidad existen diversos laboratorios virtuales, como el

cloudlabs, LIID y algetec estos laboratorios virtuales se basan en modelos matemáticos que se ejecutan en ordenadores, esta configuración y puesta en marcha es más sencilla que la configuración y puesta en marcha de los laboratorios físicos. Como adicional, presentan un grado de confianza y seguridad más elevado ya que al no tener implementos y maquinas reales éstos no pueden causar problemas en el espacio. (Calvo, López, Gangoiti, & Zulueta, 2005). La aplicación de estos laboratorios virtuales en proyectos de investigación constituye, una opción ya sea por falta de equipos disponible o mantenimiento de los mismos.

Para poder obtener la dureza de los materiales, mediante software CAD y laboratorios virtuales, se aplicarán las normas ASTM que es la Sociedad Americana para Pruebas y Materiales, es una organización de normas internacionales que desarrolla y publica acuerdos de normas técnicas para materiales, productos, sistemas y servicios.

De acuerdo a todo lo expuesto por diferentes autores, se puede inferir que es importante realizar una investigación detallada que permita establecer bibliográficamente las mejores formas de obtener propiedades mecánicas de materiales, mediante laboratorio virtual y a partir de las mismas poder generar simulaciones con software CAD y laboratorios virtuales aplicando las normativas vigentes para cada ensayo.

1.2. Planteamiento del problema

¿Se puede determinar la Dureza Brinell, Rockwell y Vickers de los materiales bajo normas utilizando laboratorios virtuales y software CAD?

1.3. Justificación e Importancia

Los laboratorios virtuales y los simuladores pueden favorecer a el desarrollo de habilidades y competencias en estudios de ensayos de las

propiedades mecánicas y obtención de datos de las pruebas en el campo de la mecánica de materiales, a través de un estudio y comportamiento físico de los materiales a diversas pruebas, con esto se evitaría la inversión de una cantidad significativa de dinero en un durómetro, la cual a través de los años debido a uso en las diversas aplicaciones prácticas se puede llegar a quedar fuera de uso por falta de mantenimiento o de implementos.

Pero a pesar de la aplicación de estos laboratorios virtuales y software CAD, que pueden llegar a ser una opción significativa tanto en el aspecto económico como de aprendizaje, se recomienda la adquisición de durómetros, al menos 3 para que cada uno se utilice en el desarrollo de un ensayo de dureza específico.

El desarrollo del presente trabajo se origina por la pandemia ocasionada por COVID-19 (Coronavirus), ya que debido a este suceso que conmocionó al mundo y se tuvieron que buscar alternativas no convencionales para el desarrollo de actividades que normalmente se las hacía de manera presencial, la generación del presente trabajo de investigación favorece al desarrollo práctico en el área de la mecánica de materiales.

En la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE extensión Latacunga, en el Departamento de Energía y Mecánica, se dispone de dos durómetros para los ensayos, pero estos debido a la falta del mantenimiento y de la falta de indentadores quedaron fuera de uso.

La implementación de los laboratorios virtuales y software CAD en el desarrollo de ensayos mecánicos, representa una alternativa de innovación en el de enseñanza tradicional, llegando a ser una opción que se puede tomar en cuenta cuando se retomen las clases de manera presencial.

En "DISEÑO DE UN LABORATORIO VIRTUAL DE ENSAYOS

DESTRUCTIVOS Y METALOGRAFÍA MEDIANTE EL SOFTWARE SKETCHUP Y SHAPESPARK PARA PRÁCTICAS EN LAS ASIGNATURAS DE CIENCIAS DE MATERIALES” por parte de (Salazar, 2020) se menciona que un laboratorio virtual es una herramienta didáctica para el conocimiento de información en asignaturas prácticas, que se toman dentro de laboratorios físicos en los centros de educación. Mediante escenarios 3D, permiten representar la realidad tridimensional de un laboratorio físico, que son producidos en programas de simulación, facilitan que las personas que realicen estos ensayos en las plataformas Web permitiendo elaborar diversos intentos a la vez, a comparación de hacerlo en un laboratorio convencional, donde se enfrenta un estrés por prácticas mal ejecutadas y no se logra al primer intento, por ende, esto causa perdida de tiempo y material. Estas herramientas permiten mejorar la relación enseñanza - aprendizaje desarrollado en un ambiente totalmente virtual, experimentado sus prácticas de una manera personalizada y privada.

En caso de que estos laboratorios virtuales y softwares CAD no se aplique para desarrollar estas prácticas, no se realizaría la aplicación práctica de la teoría y no se reafirmarían los conocimientos adquiridos por medio bibliográfico de los estudiantes.

En tal sentido, este estudio está proyectado determinar la dureza de los materiales mediante laboratorio virtual y a partir de las mismas poder generar simulaciones con software CAD, aplicando las normativas vigentes para cada ensayo, mediante la comparación de los valores obtenidos en los laboratorios virtuales y el software CAD.

1.4. Objetivos

1.4.1. Objetivo General

Determinar la dureza de los materiales bajo normas utilizando laboratorios virtuales y software CAD.

1.4.2. Objetivos específicos

- Realizar el ensayo de Dureza Brinell, Rockwell y Vickers del acero dulce, latón y aluminio en un laboratorio virtual
- Realizar el ensayo de Dureza Brinell, Rockwell y Vickers del acero dulce, latón y aluminio mediante software CAD

1.5. Hipótesis

La utilización de laboratorios virtuales y software CAD serán viables para determinar la dureza de los materiales bajo normas.

1.6. Variables de investigación

1.6.1. Variables independientes.

Laboratorios Virtual y Software CAD.

1.6.2. Variables dependientes.

Dureza de los materiales bajo normas.

Capítulo II

2. Marco teórico

2.1. Definición de laboratorio virtual

Un laboratorio virtual se enfoca el uso de software digitales, genérico o específico, para simular el comportamiento de máquinas, implementos o laboratorios de experimentación con base en patrones hallados por la ciencia y que solo existen en los ordenadores usados para la simulación. Esto implica una contribución a la enseñanza por parte de las TIC, lo que aumenta la disponibilidad de laboratorios y la oportunidad de tener un conocimiento práctico de los ensayos. Con esto, un laboratorio virtual es una alternativa a la experimentación real y acertada en las distintas posibilidades de la ingeniería, pero es factible en otras ramas científicas y técnicas. (Velasco, Arellano, Martínez, & Velasco, 2013).

Entre los laboratorios virtuales más conocidos y empleados, se describen a continuación:

2.1.1. *Praxilabs*.

En Praxilabs los laboratorios virtuales son entornos virtuales diseñados para diversos experimentos, a través de ellos se simula el laboratorio de ciencias real para vincular el lado práctico con el lado teórico. Todos los estudiantes tienen la libertad de realizar los experimentos sin un supervisor y sin estar expuestos a ningún tipo de peligro. Esto se hace a través de aplicaciones informáticas que cubren todos los campos de la ciencia. Esto ahorra mucho esfuerzo y tiempo a estudiantes y profesores. Los profesores pueden preparar experimentos en cualquier momento. (Praxilabs, 2018)

2.1.2. Algetec.

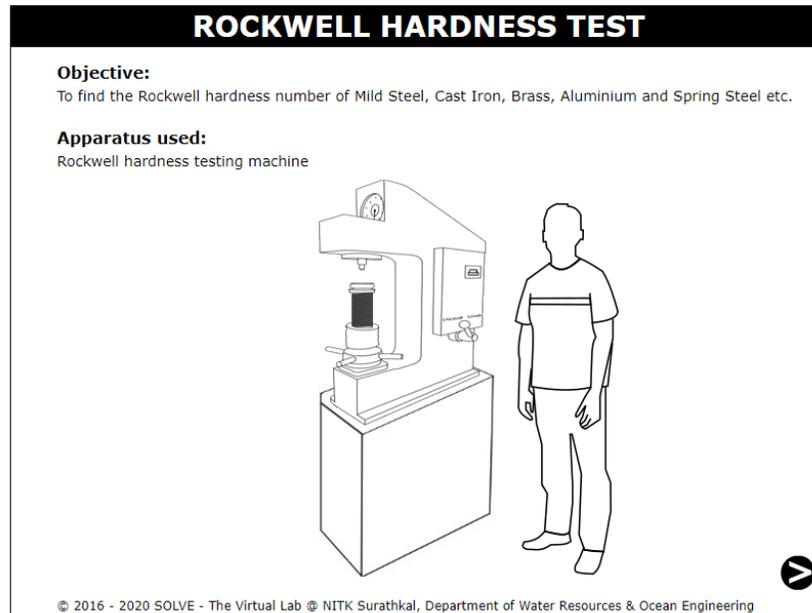
Los Laboratorios Virtuales son prácticas guionizadas asociadas al plan educativo de la institución educativa, que pasan por todos los laboratorios de ingeniería y salud y siguen con un alto grado de fidelidad los experimentos realizados en los equipos físicos de ALGETEC. En esta plataforma, el alumno podrá aprender, a través de un lenguaje moderno, todos los conceptos de las clases prácticas en una disciplina en particular. En puntos predeterminados de los contenidos cubiertos por cada asignatura, el entorno de aprendizaje virtual indica que el alumno necesita practicar a través del Laboratorio Virtual. Después de completar las prácticas virtualizadas, el estudiante puede experimentar con el equipo físico de ALGETEC. (Algetec, 2016)

2.1.3. Virtual Labs.

En el marco del proyecto de laboratorios virtuales, se diseñaron más de 100 laboratorios virtuales que consisten en aproximadamente más de 700 experimentos habilitados para la web para operación y visualización remotas. Los beneficiarios previstos de los proyectos son: Todos los estudiantes y miembros de la facultad de las facultades de ciencias e ingeniería que no tienen acceso a buenas instalaciones y/o instrumentos de laboratorio. Estudiantes de secundaria, cuya curiosidad se activará, posiblemente motivándolos a realizar estudios superiores. Investigadores de diferentes institutos que puedan colaborar y compartir recursos. Distintas facultades de ingeniería que pueden beneficiarse de los contenidos y recursos didácticos relacionados. Los laboratorios virtuales no requieren ninguna configuración de infraestructura adicional para realizar experimentos en las instalaciones del usuario. Se puede acceder a los experimentos basados en simulaciones de forma remota a través de Internet. (Labs, s.f.)

Figura 1

Laboratorio Virtual de Ensayo de Dureza.



Nota. Interfaz del laboratorio virtual Virtual Labs. Tomado de Ensayo de dureza Rockwell laboratorio virtual

2.2. Software CAD

El diseño que es asistido mediante la ayuda de un computador (CAD) se basa en utilizar de programas de computadora para elaborar, alterar, analizar y documentar representaciones gráficas que se pueden observar en 2 o 3 dimensiones (2D o 3D) de elementos físicos como una opción a los borradores elaborador manualmente y a los prototipos de producto. El CAD se emplea de manera significativa en los efectos especiales en los medios y en la animación por computador, así como en el diseño industrial y de elementos. (SIEMENS, 2021)

Entre los Software CAD más conocidos y empleados, se describen a continuación:

2.2.1. Inventor.

La empresa más conocida por arquitectos y diseñadores industriales, Autodesk, ayuda al diseño de elementos con el software de CAD llamado Inventor facilitando herramientas a los profesionales y específicas haciendo énfasis en el diseño mecánico, acotado y de elementos, de tiene también un aporte de herramientas para la documentación y la simulación de elementos en 3D, de forma que tanto los diseñadores como clientes, tiene la facultar de elaborar de manera sencilla prototipos visuales listos para ser ensayados mediante pruebas e impresiones de boceto 3D. (Perdomo, 2020)

Conservando todas las ventajas de facilitar herramientas de diseño que cumplen normas estándares y de licencias, opciones referentes a parámetros, archivos exportables a producción, etc. Es un programa enfocado principalmente para el sector de diseño de elementos donde se tendrán la ventaja de acceder a las herramientas rápidas paramétricas, normativas, funciones rápidas, simulador 3D y diversas opciones que en otros programas de CAD establa en un segundo plano. (Perdomo, 2020)

2.2.2. Ansys.

Ansys brinda un paquete de aplicaciones que comprende en su mayoría las gamas de la física, facilitando a las empresas a obtener un valor mejorado para la inversión en simulación enfocada a la ingeniería, ya que tiene herramientas más avanzadas de Computer-Aided Engineering (CAE) en el área de fluidodinámica, análisis estructural, electromagnetismo y multifísica.

El desarrollo de elementos encaminados por simulación conlleva a la ingeniería a un nuevo nivel. La perfección y alta precisión del software, conjuntamente con su gran escalabilidad de ingeniería y arquitectura que se adapta fácilmente, definen la tecnología Ansys también de cualquier otra

herramienta de CAE. Estas ventajas añaden un valor al proceso de proyecto de ingeniería, brindando una alta eficiencia, generando innovación y reduciendo complicaciones físicas, permitiendo pruebas simuladas que serían imposibles de elaborar con prototipos físicos. (experts, 2021)

2.2.3. Solidworks.

Solidworks es un software de diseño en 3D asistido por computador. Con este conjunto de CAD 3D se puede crear, simular y gestionar modelos en la tercera dimensión, hasta se pueden publicar y vender por medio de esta plataforma. Debido a esto, es uno de los softwares preferidos de modelado sólido de la industria.

Una de las características más llamativas de este software de diseño Solidworks es que se pueden crear bocetos en 2D que son imágenes planas sin perspectiva y poder simular su utilidad, para esto se ayuda de funciones complicadas de simulación que permiten testear el rendimiento de un elemento en un espacio real de situaciones físicas. (ABAX, 2020)

2.3. Durómetro.

2.3.1. Definición de durómetro.

Un durómetro es un equipo de obtención de valores de dureza de un material, tomando en cuenta distintos procedimientos y parámetros que pueden realizarse para la obtención de valores de dureza. Los procedimientos más conocidos son: Rockwell, Brinell, Vickers y Microvickers. La dureza de un material no tiene una definición como tal, pero se puede definir como la propiedad que tiene un material para resistir a la penetración de una carga (R, s.f.), en la figura 2 se tiene un durómetro DURAMIN - 3000.

Figura 2

Durómetro.



Nota. Durómetro empleado para ensayos de dureza. Tomado de Durómetro Brinell resistente y fiable

2.3.2. Principio de Funcionamiento.

La base fundamental para el funcionamiento de un durómetro se centra en la aplicación de una carga sobre la superficie de una probeta de un material. Se escoge una carga en dependiendo del material a ensayar y un elemento indentador, ambos normalizados. Se aplica la carga que dejara una huella de indentación en la probeta del material. Una vez que termine la aplicación de la carga, se mide la profundidad de la huella que dejo el indentador. En función de esta profundidad mediante la aplicación de formula dependiendo de la dureza a obtener se obtiene el valor de la dureza del material. (R, s.f.)

2.3.3. Partes del durómetro.

En la figura 3 se observa que el durómetro se divide en 2 partes principales:

- El cuerpo: Es el originador de la fuerza que se aplica sobre la pieza de

prueba. Estas cargas tienen que estar estandarizadas.

- El elemento penetrante: Es el elemento que se pone en la punta de la máquina y el encargado de dejar la huella en la pieza de prueba. Se tienen distintos indentadores estos son en función del ensayo que se utilice para obtener y estos elementos también son normalizados.

Figura 3

Partes del durómetro.



Nota. Partes principales que interfieren en el ensayo de dureza. Tomado de Durómetro Brinell resistente y fiable

2.4. Ensayos de Dureza

La elaboración del ensayo de dureza da la facultad de evaluar las propiedades de un material, como su fuerza, ductilidad y resistencia al desgaste. De igual manera facilita a determinar si un material o el tratamiento de un material es adecuado para una aplicación específica. (Metalinspec, 2021)

El ensayo de dureza se define como "una evaluación que permite determinar la resistencia de un material a la deformación permanente mediante la penetración de otro material más duro". A pesar de lo anterior detallado, la dureza no se toma como una propiedad fundamental de un material. A pesar de esto, cuando se obtienen conclusiones de un ensayo de dureza, siempre se debe analizar el valor cuantitativo. (Metalinspec, 2021)

Tomando en cuenta:

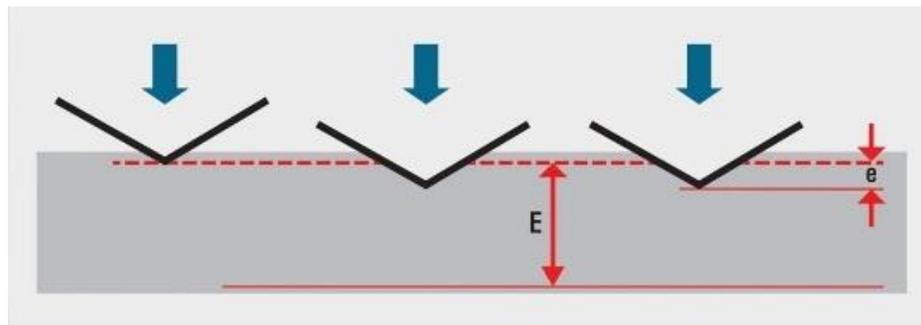
- La carga aplicada en el penetrador
- Un perfil de tiempo de carga específico y una duración de carga específica
- Una geometría de penetrador específica

2.4.1. Ensayo de Dureza Rockwell.

El ensayo de dureza Rockwell es un ensayo de dureza rápido elaborado para el control de producción, ya que dispone de una lectura directa de los resultados y se utiliza en su gran mayoría con materiales metálicos. En la figura 4 se observa que la dureza Rockwell (HR) se calcula midiendo la profundidad de la indentación después de haber forzado un indentador en un material de muestra conforme a una carga concreta. (Metalinspec, 2021)

Figura 4

Ensayo de Dureza Rockwell.



Nota. Dureza Rockwell. Tomado de ¿Cuáles son los métodos de dureza más comunes?

2.4.2 Ensayo de Dureza Brinell.

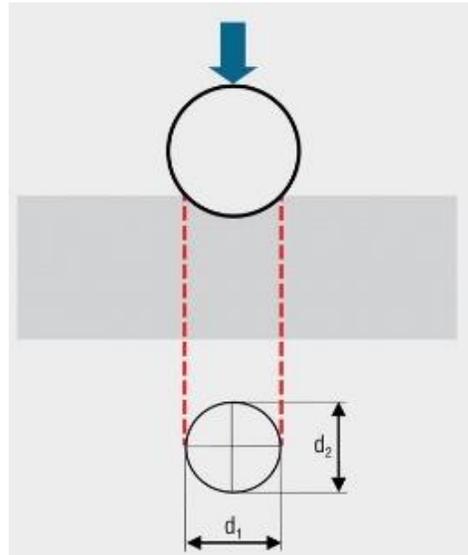
El ensayo de dureza Brinell se emplea para pieza de prueba de mayor tamaño con una estructura de grano grande o irregular. En la figura 5 se observa que la indentación del ensayo de dureza Brinell (HBW) deja una

impresión significativamente grande al utilizar la bola de carburo de tungsteno.

El tamaño de la indentación se lee ópticamente. (Metalinspec, 2021)

Figura 5

Ensayo de Dureza Brinell.



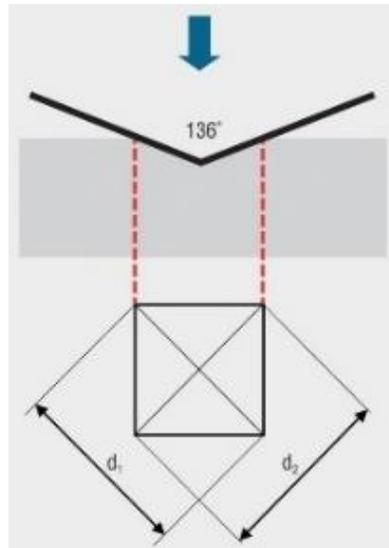
Nota. Dureza Brinell. Tomado de ¿Cuáles son los métodos de dureza más comunes?

2.4.3 Ensayo de Dureza Vickers.

El ensayo de dureza Vickers es un ensayo de dureza que se emplea en su mayoría para todos los materiales sólidos, dentro de estos los materiales metálicos. En la figura 6 se observa que la dureza Vickers (HV) se calcula midiendo las longitudes diagonales causadas por una indentación realizada al introducir un indentador piramidal de diamante con una carga concreta en una probeta de prueba de un material. El tamaño de las diagonales de la indentación se lee ópticamente a fin de determinar la dureza usando una tabla o fórmula. (Metalinspec, 2021)

Figura 6

Ensayo de Dureza Vickers.



Nota. Dureza Vickers. Tomado de ¿Cuáles son los métodos de dureza más comunes?

2.5. Normativas

2.5.1. ASTM_E10-15.

De acuerdo a la norma ATM E10-15 se tiene parámetros a considerar para la realización de ensayos de dureza Brinell, como indentadores, el tiempo de aplicación de la carga, piezas de pruebas, cargas aplicadas que se detallan a continuación:

a. Indentadores.

Los penetradores para la prueba de dureza Brinell serán bolas de carburo de tungsteno de cuatro diámetros permitidos, en la figura 7 se observa los indentadores de 1, 2.5, 5 y 10 mm.

Figura 7

Indentadores de bolas de carburo de tungsteno.



Nota. Indentadores empleados en el ensayo Brinell. Tomado de Rockwell indentador de bolas.

En la escala de dureza Brinell, como se observa en la tabla 1 existen 24 tipo de escalas las cuales se diferencian por el tipo de indentador empleado y la carga aplicadas.

Tabla 1

Escalas de dureza brinell

Escala de dureza Brinell	Diámetro de la bola D (mm)
HBW 10/3000	10
HBW 10/1500	10
HBW 10/1000	10
HBW 10/500	10
HBW 10/250	10
HBW 10/125	10
HBW 10/100	10
HBW 5/750	5
HBW 5/250	5

Escala de dureza Brinell	Diámetro de la bola D (mm)
HBW 5/125	5
HBW 5/67.5	5
HBW 5/31.25	5
HBW 2.5/187.5	2.5
HBW 2.5/62.5	2.5
HBW 2.5/31.25	2.5
HBW 2.5/15.62	2.5
HBW 2.5/7.81	2.5
HBW 2.5/6.25	2.5
HBW 1/30	1
HBW 1/10	1
HBW 1/5	1
HBW 1/ 2.5	1
HBW 1/1.25	1
HBW 1/1	1

Nota. Escala de dureza en el ensayo Brinell. Adaptado de Standard Test Method for Brinell Hardness Testing of Metallic Materials

En el laboratorio virtual que se empleará, se utilizan indentadores de bola de 10 mm, con lo cual se puede determinar escalas HBW 10 que se tiene especificado en la tabla 1.

b. Tiempo.

En la tabla 2 se puede observar los tiempos de los ciclos de pruebas.

Tabla 2*Tiempo en ensayo Brinell*

Parámetro de ciclo de prueba	Tolerancia
Tiempo de aplicación de la fuerza de prueba	2.0 a 8.0 s
Tiempo de permanencia de la fuerza de prueba	10.0 a 15.0 s

Nota. Tiempo de prueba empleados en el ensayo Brinell. Adaptado de Standard Test Method for Brinell Hardness Testing of Metallic Materials

c. Formula de Dureza Brinell.

El Número de dureza Brinell se calcula como:

$$HBW = \frac{2F}{\pi D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

Donde:

- F: es la fuerza de prueba aplicada en kilogramos fuerza (kgf).
- D: es el diámetro del penetrador en mm.
- d: es el diámetro de la impresión de la esfera en mm.

d. Pieza de Prueba.

El espesor de la muestra ensayada esta definido para que no aparezca ningún bulto u otra señal que muestre el efecto de la fuerza de ensayo en el lado de la pieza contrario a la indentación. En la tabla 3 se observa que el espesor del material sometido a prueba debe ser al menos diez veces mayor que la profundidad de la muesca.

Tabla 3

Espesor de la probeta en función de 10 veces la indentación.

Diámetro de indentación D (mm)	Espesor mínimo de la muestra		
	Con bola de 10 (mm)	Con bola de 5 en (mm)	Con bola de 2.5 en (mm)
0,2			0,1
0,3			0,2
0,4			0,4
0,5			0,7
0,6			0,4
0,7			0,5
0,8			0,7
0,9			0,8
1,0			1,0
1,1			1,3
1,2		0,7	
1,3		0,9	
1,4		1,0	
1,5		1,2	
1,6		1,3	
1,7		1,5	
1,8		1,7	
1,9		1,9	
2,0		2,1	
2,1		2,6	
2,2		2,6	
2,4	1,5		
2,6	1,7		
2,8	2,0		
3,0	2,3		
3,2	2,6		
3,4	3,0		
3,6	3,4		
3,8	3,8		
4,0	4,2		
4,2	4,6		
4,4	5,1		
4,6	5,6		
4,8	6,1		
5,0	6,7		
5,2	7,3		
5,4	7,9		
5,6	8,6		
5,8	9,3		

Nota. Espesores necesarios en las probetas en el ensayo Brinell. Adaptado de Standard Test Method for Brinell Hardness Testing of Metallic Materials

e. Carga.

En la tabla 4 se puede diferenciar las escalas de dureza dependiendo de la fuerza a ensayar, que va desde 1kgf hasta 3000 kgf.

Tabla 4

Diámetro de indentadores

Escala de dureza Brinell	Valor nominal de la fuerza (kgf)
HBW 10/3000	3000
HBW 10/1500	1500
HBW 10/1000	1000
HBW 10/500	500
HBW 10/250	250
HBW 10/125	125
HBW 10/100	100
HBW 5/750	750
HBW 5/250	250
HBW 5/125	125
HBW 5/67.5	67.5
HBW 5/31.25	31.25
HBW 2.5/187.5	187.5
HBW 2.5/62.5	62.5
HBW 2.5/31.25	31.25
HBW 2.5/15.62	15.62

Escala de dureza Brinell	Valor nominal de la fuerza (kgf)
HBW 2.5/7.81	7.81
HBW 2.5/6.25	6.25
HBW 1/30	30
HBW 1/10	10
HBW 1/5	5
HBW 1/ 2.5	2.5
HBW 1/1.25	1.25
HBW 1/1	1

Nota. Cargas empleadas en el en el ensayo Brinell. Adaptado de Standard Test Method for Brinell Hardness Testing of Metallic Materials

En el laboratorio virtual que se empleará, la carga depende del tipo de material a ensayar, con lo cual en la tabla 5 se observa los 3 tipos de carga de 3000kg , 1000 kg y 500 kg.

Tabla 5

Carga dependiendo del material a ensayar

Material	Carga
Hierro fundido y acero dulce	3000 kgf
Latón, cobre y bronce	1000 kgf
Aluminio, magnesio y zinc	500 kgf

Nota. Cargas empleadas dependiendo del material a ensayar. Adaptado de Prueba de dureza Brinell

2.5.2 ASTM_E18-15 Rockwell.

De acuerdo a la norma ASTM E18-15 se tiene parámetros a considerar para la realización de ensayos de dureza Rockwell, como indentadores, el tiempo de aplicación de la carga, piezas de pruebas, cargas aplicadas que se detallan a continuación:

a. Indentadores.

En la figura 8 se observa que los penetradores estándar de Rockwell son penetradores esferos cónicos de diamante o bolas de carburo de tungsteno de 1.588 mm (1/16 in), 3,175 mm (1/8 in.), 6.350 mm (1/4 in) o 12,70 mm (1/2 in) de diámetro.

Figura 8

Indentadores de bola y esfero cónicos.



Nota. Indentadores empleados en el ensayo de dureza Rockwell. Tomado de Indentador para ensayo de dureza

En la escala Rockwell se tiene diversas escalas, en la tabla 6 se tiene las 30 escalas con su símbolo y el tipo de penetrador empleador en cada una.

Tabla 6*Diámetro de indentadores*

Escala Símbolo	Tipo de penetrador
HRA	Diamante esfero cónico
HRBW	Bola WC 1/16 in
HRC	Diamante esfero cónico
HRD	Diamante esfero cónico
HREW	Bola WC 1/8 in
HRFW	Bola WC 1/16 in
HRGW	Bola WC 1/16 in
HRHW	Bola WC 1/8 in
HRKW	Bola WC 1/8 in
HRLW	Bola WC ¼ in
HRMW	Bola WC ¼ in
HRPW	Bola WC ¼ in
HRRW	Bola WC ½ in
HRSW	Bola WC ½ in
HRVW	Bola WC ½ in
HR15N	Diamante esfero cónico
HR30N	Diamante esfero cónico

Escala Símbolo	Tipo de penetrador
HR45N	Diamante esfero cónico
HR15TW	Bola WC 1/16 in
HR30TW	Bola WC 1/16 in
HR45TW	Bola WC 1/16 in
HR15WW	Bola WC 1/8 in
HR30WW	Bola WC 1/8 in
HR45WW	Bola WC 1/8 in
HR15XW	Bola WC ¼ in
HR30XW	Bola WC ¼ in
HR45XW	Bola WC ¼ in
HR30YW	Bola WC ½ in
HR30YW	Bola WC ½ in
HR45YW	Bola WC ½ in

Nota. Diametro de indentadores segun la escalas en el ensayo de dureza Rockwell. Adaptado de Standard Test Method for Rockwell Hardness Testing of Metallic Materials

En el laboratorio virtual que se empleará, el tipo de indentador depende del material a ensayar, puede ser de diamante esferocónico o de bola como se observa en la tabla 7.

Tabla 7*Indentadores dependiendo del material a ensayar*

Material	Tipo de penetrador
Hierro Fundido	Bola de carburo de tungsteno
Aluminio	Bola de carburo de tungsteno
Acero Dulce	Bola de carburo de tungsteno
Latón	Bola de carburo de tungsteno
Acero	Diamante esfero cónico

Nota. El indentador empleado depende del material a ensayar. Adaptado de Prueba de dureza Rockwell

b. Tiempo.

En la tabla 8 se puede observar los tiempos de tolerancia de los ciclos de pruebas.

Tabla 8*Tiempos de tolerancia de los ciclos*

Parámetro de ciclo de prueba	Tolerancia
Tiempo de permanencia del a fuerza preliminar	3.0 ± 1.0 s
Tiempo para la aplicación de fuerza adicional <i>tTA</i>	1.8 a 8.0 s
Tiempo de permanencia de la fuerza total <i>tTF</i>	1.0 a 5.0 s
Tiempo de permanencia para la recuperación elástica <i>tR</i>	4.0 a 1.0 s

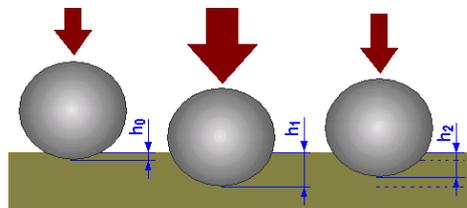
Nota. Tiempos empleados en el ensayo de dureza Rockwell. Adaptado de Standard Test Method for Rockwell Hardness Testing of Metallic Materials

c. Cálculo de la dureza Rockwell.

Durante una prueba de Rockwell, la fuerza sobre el penetrador aumenta de una fuerza de prueba preliminar a una fuerza de prueba total, y luego se vuelve a la fuerza de prueba preliminar. La diferencia en las dos medidas de profundidad de indentación, mientras se encuentra bajo la fuerza de prueba preliminar, se mide como h_2 como se observa en la figura 9. La unidad de medida para h es mm. Del valor de h , se deriva el número de dureza de Rockwell.

Figura 9

Diferencias de las medidas de profundidad.



Nota. Parámetros a considerar en el cálculo de dureza Rockwell. Tomado de Ensayo Rockwell

$$\text{Dureza Rockwell} = 100 - \frac{h}{0.002}$$

$$\text{Dureza Superficial Rockwell} = 100 - \frac{h}{0.001}$$

Para escalas que utilizan un penetrador de bola

$$\text{Dureza Rockwell} = 130 - \frac{h}{0.002}$$

$$\text{Dureza Superficial Rockwell} = 100 - \frac{h}{0.001}$$

d. Cargas.

Hay dos clasificaciones generales de la prueba de Rockwell: la prueba de dureza de Rockwell y la prueba de dureza superficial de Rockwell. La diferencia entre las dos clasificaciones de prueba está en las fuerzas de prueba que se utilizan.

Para elaborar el ensayo de dureza Rockwell, la fuerza de prueba preliminar aplicada en la pieza de prueba es de es 10 kgf (98 N) y las fuerzas de prueba totales son 60 kgf (589 N), 100 kgf (981 N) y 150 kgf (1471 N).

Para elaborar el ensayo de dureza superficial de Rockwell, la fuerza de prueba preliminar aplicada en la pieza de prueba es de es 3 kgf (29 N) y las fuerzas de prueba totales son 15 kgf (147 N), 30 kgf (294 N) y 45 kgf (441 N).

En la escala Rockwell se tiene diversas escalas, en la tabla 9 se puede observar las 15 escalas dependiendo de la fuerza a aplicar y del indentador aplicado a cada uno.

Tabla 9

Fuerza Aplicada dependiendo del indentador y la escala.

Escala símbolo	Fuerza Total (Kgf)	Indentador
B	100	Bola de diamante
C	150	Diamante
A	60	Diamante
D	100	Diamante
E	100	Bola 1/8 in
F	60	Bola 1/16 in

Escala símbolo	Fuerza Total (Kgf)	Indentador
G	150	Bola 1/16 in
H	60	Bola 1/8 in
K	150	Bola 1/8 in
L	60	Bola 1/4 in
M	100	Bola 1/4 in
P	150	Bola 1/4 in
R	60	Bola ½ in
S	100	Bola ½ in
V	150	Bola ½ in

Nota. Carga dependiendo de la escala a ensayar en el ensayo de dureza Rockwell. Adaptado de Standard Test Method for Rockwell Hardness Testing of Metallic Materials

En el laboratorio virtual que se empleará, se aplica a todo material una carga preliminar de 10 kg la carga a aplicar depende el material como se observa en la tabla 10.

Tabla 10

Fuerza Aplicada dependiendo del material.

Material	Carga a aplicar
Hierro Fundido	100 kg
Aluminio	100 kg
Acero Dulce	100 kg

Material	Carga a aplicar
Latón	100 kg
Acero	150 kg

Nota. La fuerza aplicada en el ensayo depende del material. Adaptado de Prueba de dureza Rockwell

e. Piezas de Prueba.

El espesor de la probeta o de la capa bajo ensayo debe ser el definido en la tabla 11 si se emplea penetrador de bola de 1/16 o en la tabla 12 si se emplea penetrador de diamante. Esta tabla se obtuvo mediante un análisis en tiras de acero al carbono. Para todos los demás materiales, se recomienda que el grosor exceda 10 veces la profundidad de indentación.

Tabla 11

Espesor de las probetas con penetrador de bola de 1/16 in

Grosor mínimo (mm)	Escala Rockwell	
	F	B
0.56
0.61	98	94
0.66	91	87
0.71	85	80
0.76	77	71
0.81	69	62
0.86	...	52
0.91	...	40
0.96	...	28

Grosor mínimo (mm)	Escala Rockwell	
	F	B
1.02

Nota. El espesor de la probeta depende del indentador empleado. Adaptado de Standard Test Method for Rockwell Hardness Testing of Metallic Materials.

Tabla 12

Espesor de las probetas con penetrador de diamante

Grosor mínimo (mm)	Escala Rockwell	
	F	B
0.36
0.41	86	...
0.46	84	...
0.51	82	...
0.56	79	69
0.61	76	67
0.66	71	65
0.71	97	62
0.76	60	57
0.81	...	52
0.86	...	45
0.91	...	37
0.96	...	28
1.02	...	20

Nota. El espesor de la probeta depende del indentador empleado .Adaptado de Standard Test Method for Rockwell Hardness Testing of Metallic Materials

2.5.3 ASTM_E92-17.

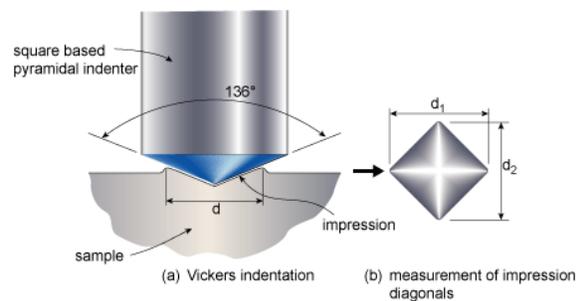
De acuerdo a la norma ASTM E92-17 se tiene parámetros a considerar para la realización de ensayos de dureza Vickers, como indentadores, el tiempo de aplicación de la carga, piezas de pruebas, cargas aplicadas que se detallan a continuación:

a. Indentadores.

El penetrador de Vickers ideal es un diamante piramidal de base cuadrada, en la figura 10 se observa que es puntiagudo y elevadamente pulido con ángulos de cara de 136° .

Figura 10

Indentadores de diamante piramidal de base cuadrada.



Nota. Parámetros principales en el indentador vickers. Tomado Vickers probador de la dureza/penetrador Vickers

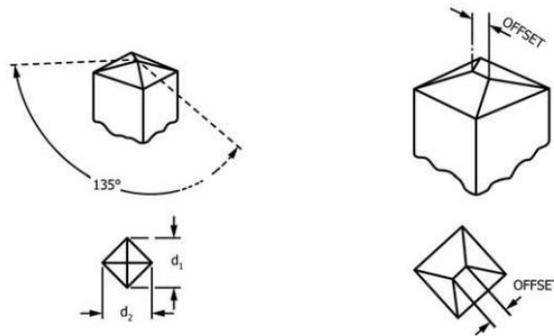
En la tabla 13 se observa la máxima dilatación que puede tener un indentador dependiendo de la clase.

Tabla 13*Indentador Vickers*

Indentadores		
Característica geométrica	Clase de penetrador	Máximo dilatación
Ángulos	A y B	0.07°
Desplazamiento de unión	B	0.5 µm
Desplazamiento de unión	A	0.3 µm

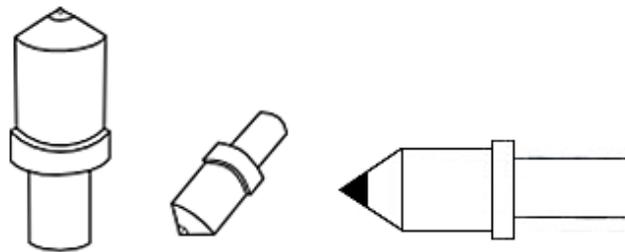
Nota. Características del indentador en el ensayo Vickers. Adaptado de Standard Test Method for Vickers Hardness Testing of Metallic Materials International. Reproducido con permiso del autor.

En la figura 11 se observa que las cuatro caras del diamante estarán idénticamente inclinadas al eje del indentador hacia dentro 30°. El recorrido de la unión frontal, no excederá de 1 µm cuando se realicen ensayos con fuerzas de ensayo de 1 kgf o más. Al realizar pruebas con fuerzas inferiores a 1 kgf, la desviación no excederá de 0,5 µm.

Figura 11*Penetrador Vickers.*

Nota. Angulos del indentador en el ensayo Vickers. Adaptado de Standard Test Method for Vickers Hardness Testing of Metallic Materials

En el laboratorio virtual que se empleará, se tiene un penetrador de cono de diamante con forma de pirámide de base cuadrada como se observa en la figura 12.

Figura 12*Penetrador Vickers empleado en Virtual Labs.*

Nota. Indentador empleado en el laboratorio virtual. Tomado de Penetrador Vickers

b. Tiempo.

El tiempo de aplicación de la fuerza de prueba será de entre 5 y 7 segundos. El tiempo de permanencia de la fuerza de prueba debe estar entre 13 y 15 segundos.

c. Cálculo de dureza Vickers.

El número de dureza de Vickers, en términos de fuerzas de prueba de indentación en Newtons (N) y diagonales de indentación medidas en milímetros (mm), se calcula de la siguiente manera:

$$HV = 0.1891 * \frac{F(N)}{d_v^2}$$

Siendo:

F = fuerzas de prueba de indentación

d_v = longitud diagonal media de indentación de Vickers (mm).

d. Pieza de Prueba.

El espesor de la muestra ensayada debe ser tal que no aparezca ningún bulto u otra señal que muestre el efecto de la fuerza de ensayo en el lado de la pieza contrario a la indentación. El espesor del material bajo prueba debe ser al menos diez veces la profundidad de la indentación como se observa en la tabla 14.

Tabla 14

Espesores mínimos para el ensayo de dureza Vickers.

Espesores mínimos para el ensayo de dureza Vickers.									
F(kgf)	HV								
	20	50	100	200	300	400	600	800	1000
HV0.2	0.19	0.12	0.09	0.06	0.05	0.04	0.04	0.03	0.03
HV1	0.43	0.28	0.19	0.14	0.12	0.10	0.08	0.07	0.06
HV2	0.62	0.39	0.28	0.19	0.16	0.14	0.12	0.10	0.09
HV5	1.0	0.62	0.43	0.31	0.25	0.22	0.18	0.15	0.14
HV10	1.4	0.87	0.62	0.43	0.36	0.31	0.25	0.22	0.19

Nota. Los espesores de probeta dependen de la escala a ensayar. Adaptado de Tablas de equivalencias entre escalas de durezas

e. Cargas.

Este método de prueba cubre las pruebas de dureza Vickers

realizadas, en la tabla 15 se observa que las fuerzas de prueba que van desde 9.807×10^{-3} N a 1176.80 N (1 gf a 120 kgf).

Tabla 15

Escalas de dureza estándar y fuerza de prueba

Escala Vickers	Fuerza en (kgf)
HV 0.001	0.001
HV 0.01	0.01
HV 0.015	0.015
HV 0.02	0.02
HV 0.025	0.025
HV 0.1	0.1
HV 0.2	0.2
HV 0.3	0.3
HV 0.5	0.5
HV 1	1
HV 2	2
HV 3	3
HV 5	5
HV 10	10
HV 20	20
HV 30	30
HV 50	50
HV 100	100
HV 120	120

Nota. Escalas de Dureza en el ensayo Vickers. Adaptado de Standard Test Method for Vickers Hardness Testing of Metallic Materials

En el laboratorio virtual se emplearán cargas de 10 kg, 20 kg y 30 kg dependiendo del material como se observa en la tabla 16:

Tabla 16

Carga dependiendo del material a ensayar

Material	Carga a aplicar
Aluminio	10 kg
Latón	20 kg
Acero Dulce	30 kg

Nota. Carga dependiendo del material. Adaptado de Prueba de dureza Vickers, por Virtual Labs

Capítulo III

3. Metodología de desarrollo del proyecto

En este capítulo se presentará una descripción detallada de la metodología necesaria que se seguirá con la finalidad de cumplir los objetivos establecidos para este estudio.

3.1 Laboratorio Virtual

3.1.1. Ensayo de Dureza Rockwell.

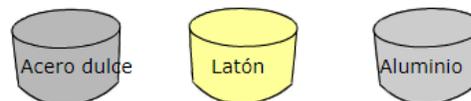
Para este modelo de ensayo se realizará de acuerdo a la norma ASTM E18-15.

a. Paso 1.

Seleccionar el material a ensayar, en la figura 13 se observa que el laboratorio virtual cuenta con piezas de prueba de acero dulce, latón y aluminio, en este caso nos enfocaremos en estos 3.

Figura 13

Materiales de Prueba ensayo Rockwell.



Nota. Materiales disponibles en el laboratorio virtual. Tomado de Prueba de dureza Rockwell

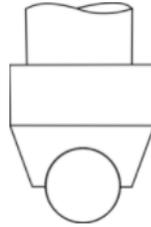
b. Paso 2.

Después de seleccionar el material a ensayar se procede a seleccionar el tipo de indentador a usar. El laboratorio cuenta con dos opciones de bola y cónico.

En este caso los materiales a ensayar son: el acero dulce, latón y aluminio. En la figura 14 se observa que se utilizará un indentador de bola.

Figura 14

Indentador del ensayo Rockwell.



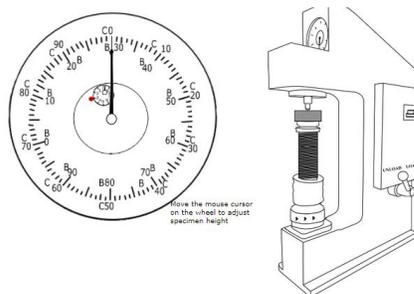
Nota. El indentador cónico se utiliza únicamente cuando el material seleccionado es de Hierro fundido, Acero dulce, Latón y Aluminio. Tomado de Prueba de dureza Rockwell

c. Paso 3.

Luego se debe de aplicar la fuerza preliminar de 10 Kg como se observa en la figura 15, esto se lo hace girando la rueda de mano hasta que la muestra en contacto con el penetrador y el puntero del medidor del cuadrante más pequeño alcanza el punto rojo como se observa en la figura 16, este proceso es el mismo en el aluminio, acero dulce y latón.

Figura 15

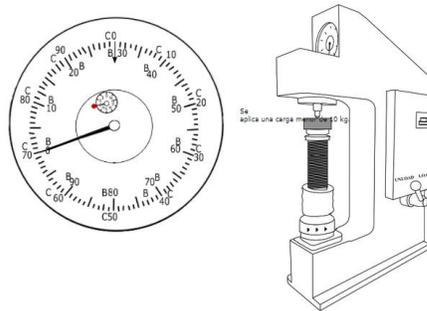
Pre aplicación de carga preliminar.



Nota. El medidor del cuadrante se encuentra en 0 por que aún no se aplica la fuerza preliminar. Tomado Prueba de dureza Rockwell

Figura 16

Aplicación de carga preliminar.



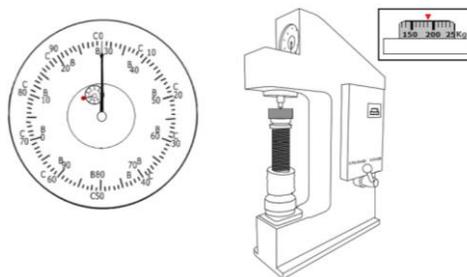
Nota. El medidor del cuadrante se encuentra en 10 kg. Tomado de Prueba de dureza Rockwell

d. Paso 4.

Luego se debe de aplicar la fuerza principal, esta dependerá del tipo de material a ensayar como se observa en la figura 17, esto con la palanca de mano que se mantiene en posición de carga. La lectura se anota utilizando una escala B o C dependiendo de la sangría utilizada.

Figura 17

Pre selección de carga Principal.



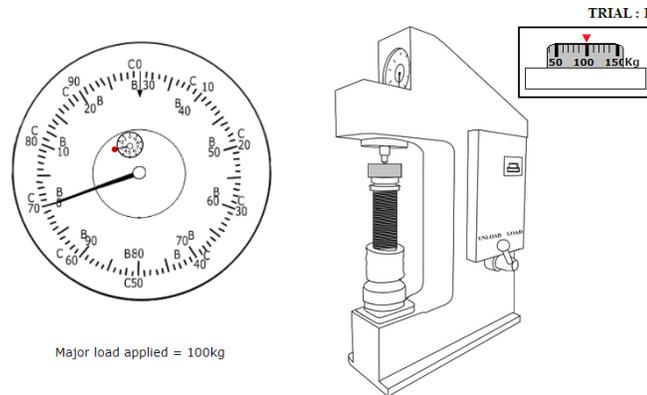
Nota. Se debe de elegir la fuerza principal dependiendo del material a ensayar.

Tomado de Prueba de dureza Rockwell

Se debe de seleccionar la carga principal de acuerdo al material en este caso del aluminio, acero dulce y latón de 100 Kg como se observa en la figura 18.

Figura 18

Selección de carga Principal.

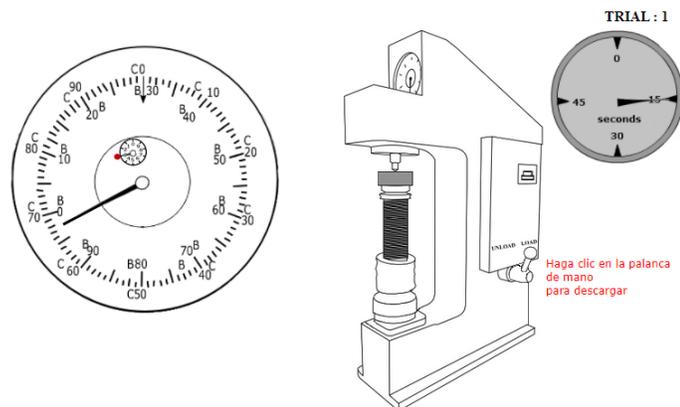


Nota. Carga para el Acero. Tomado de Prueba de dureza Rockwell

Se debe de descargar la fuerza principal al material en este caso en el aluminio, acero dulce y latón en un rango de tiempo de 10 a 15 segundos como se observa en la figura 19.

Figura 19

Tiempo de aplicación de carga Principal.

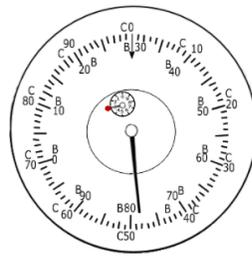


Nota. Tiempo de Carga para el Acero. Tomado de Prueba de dureza Rockwell

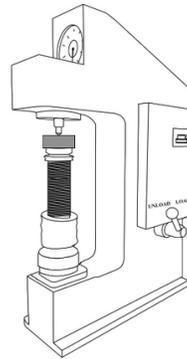
Una vez aplicada la carga preliminar y la carga principal la dureza del material aparecerá en la parte inferior del reloj, en la figura 20 para aluminio, en la figura 21 para latón y en la figura 22 para acero dulce, en la tabla 24 se observan los valores obtenidos.

Figura 20

Dureza del Acero Dulce.



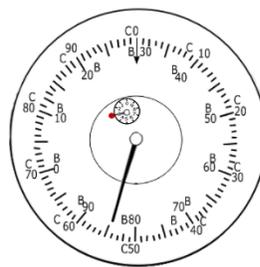
Rockwell Hardness number = 79



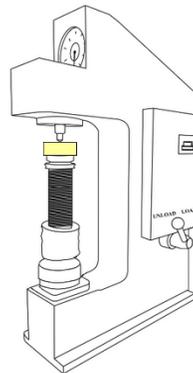
Nota. Dureza del acero dulce. Tomado de Prueba de dureza Rockwell

Figura 21

Dureza del latón.



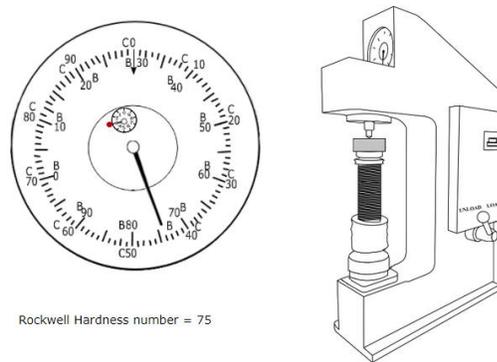
Rockwell Hardness number = 85



Nota. Dureza del latón. Tomado de Prueba de dureza Rockwell

Figura 22

Dureza del aluminio.



Nota. Dureza del aluminio. Tomado de Prueba de dureza Rockwell

e. Paso 5.

Finalmente, la dureza del material se coloca en la tabla 17 para el acero dulce, en la tabla 18 para el latón y en la tabla 19 para el aluminio ya que se realizan dos ensayos y se obtiene un promedio entre los dos valores obtenidos y se obtiene en valor de dureza del material.

Tabla 17

Dureza del acero dulce en escala C.

Material	Carga total P (kg)	Escala Utiliza	Numero de dureza Rockwell (RHN)
Acero Dulce	100	B	79

Nota. Valor de dureza del acero dulce. Adaptado de Prueba de dureza Rockwell

Tabla 18

Dureza del latón en escala C.

Material	Carga total P (kg)	Escala Utiliza	Numero de dureza Rockwell (RHN)
Latón	100	B	85

Nota. Valor de dureza del latón. Adaptado de Prueba de dureza Rockwell

Tabla 19

Dureza del aluminio en Escala C.

Material	Carga total P (kg)	Escala Utiliza	Numero de dureza Rockwell (RHN)
Aluminio	100	B	75

Nota. Valor de dureza del aluminio. Adaptado de Prueba de dureza Rockwell

Como se mencionó se debe de realizar otro ensayo para poder obtener un valor y obtener el promedio entre ambos y tener el valor de la dureza del acero dulce como se observa en la tabla 20, para el latón como se observa en la tabla 21 y del aluminio como se observa en la tabla 22.

Tabla 20

Valor promedio de dureza del acero dulce.

Prueba	Material	Carga total P (kg)	Escala Utiliza	Numero de dureza Rockwell (RHN)
1	Acero	100	B	79
2	Dulce			99

Nota. Valor de dureza promedio del acero dulce. Adaptado de Prueba de dureza Rockwell

Tabla 21

Valor promedio de dureza del latón.

Prueba	Material	Carga total P (kg)	Escala Utiliza	Numero de dureza Rockwell (RHN)
1	Latón	100	B	85
2				72

Nota. Valor de dureza promedio del latón. Adaptado de Prueba de dureza Rockwell

Tabla 22

Valor promedio de dureza del aluminio.

Prueba	Material	Carga total P (kg)	Escala Utiliza	Numero de dureza Rockwell (RHN)
1	Aluminio	100	B	75
2				66

Nota. Valor de dureza promedio del aluminio. Adaptado de Prueba de dureza Rockwell

3.1.2. Ensayo de Dureza Brinell.

Para este modelo de ensayo se realizará de acuerdo a la norma ASTM E10-15.

a. Paso 1.

Seleccionar el material a ensayar, como se observa en la figura 23 el

laboratorio virtual cuenta con piezas de prueba de acero dulce, latón y aluminio, los ensayos se enfocarán en estos 3.

Figura 23

Selección de materiales.



Nota. Materiales disponibles en el laboratorio virtual .Tomado de Prueba de dureza Brinell

b. Paso 2.

El indentador utilizado para acero dulce, latón y aluminio es de un diámetro de 10 mm.

c. Paso 3.

Luego se debe seleccionar la carga a aplicar, en la tabla 23 se observa que es dependiendo del material a ensayar, en este caso se enfocarán en el acero dulce 3000 kg, latón 1000 kg y aluminio 500 kg.

Tabla 23

Carga dependiendo del material a ensayar.

Material	Carga P (Kg), diámetro D (mm), diámetro de indentador D (10=mm)
Hierro fundido y acero dulce	$P/D^2 = 30$, P = 3000 kg
Latón, cobre y bronce	$P/D^2 = 10$, P = 1000 kg

Material	Carga P (Kg), diámetro D (mm), diámetro de indentador D (10=mm)
Aluminio, magnesio y zinc	$P/D^2 = 5$, P = 500 kg

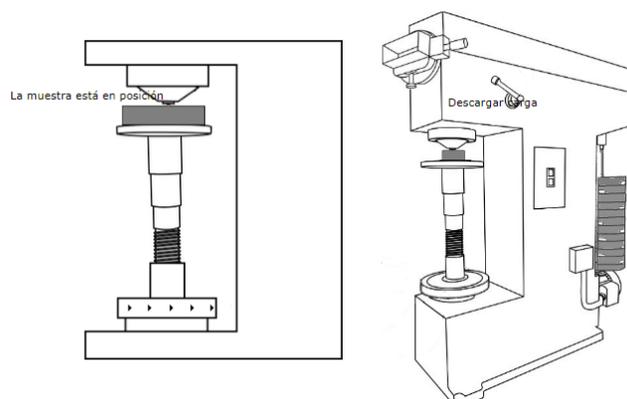
Nota. Carga dependiendo del material a ensayar. Adaptado de Prueba de dureza Brinell

d. Paso 4.

La muestra se coloca sobre la mesa de soporte como se observa en la figura 24, luego la rueda de mano debajo de la mesa se gira en sentido de las agujas del reloj, el espacio entre la superficie de la muestra y el punzón sea de 5 mm.

Figura 24

Muestra en Posición.



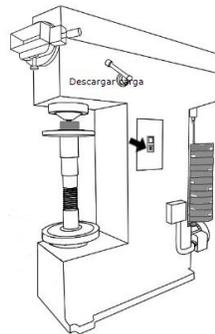
Nota. Muestra en posición, Tomado de Prueba de dureza Brinell

e. Paso 5.

Cuando el motor este encendido, la palanca manual se coloca en la posición que se observa en la figura 25. La carga aplicada debe ser durante un periodo de 10 a 15 seg como se observa en la figura 26.

Figura 25

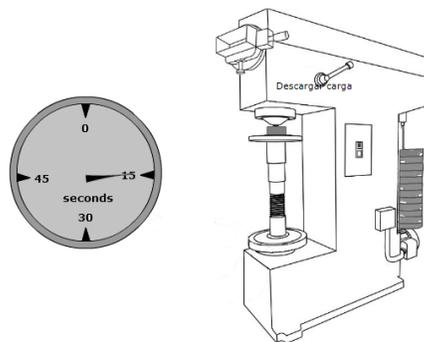
Aplicación de carga.



Nota. Aplicación de carga, Tomado de Prueba de dureza Brinell

Figura 26

Tiempo de aplicación de carga.



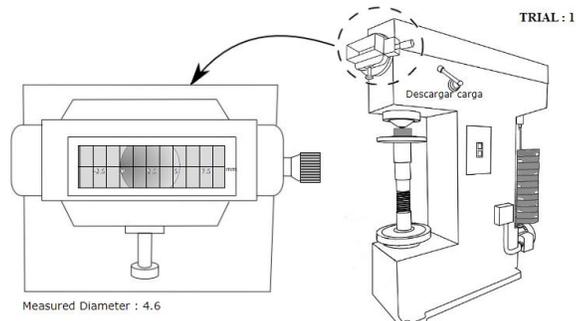
Nota. Tiempo de aplicación de carga, Tomado de Prueba de dureza Brinell

f. Paso 6.

La palanca manual se vuelve a colocar en la posición de descarga. El diámetro de la impresión se mide a través de un microscopio adjunto al aparato como se observa en la figura 27. Para el acero dulce el valor es de 4.6 mm como se observa en la figura 28, para el latón el valor es de 3,79 mm como se observa en la figura 29 y para el aluminio el valor es de 2,68 mm como se observa en la figura 30.

Figura 27

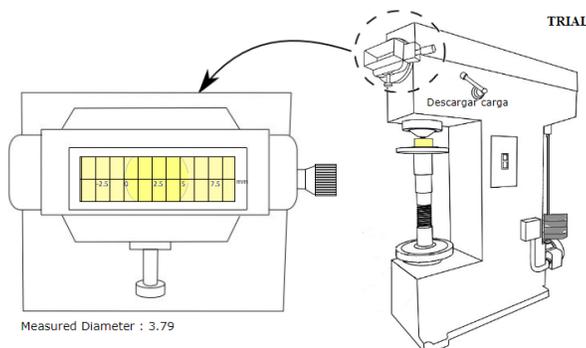
Diámetro de impresión acero dulce.



Nota. Diámetro de impresión, Tomado de Prueba de dureza Brinell

Figura 28

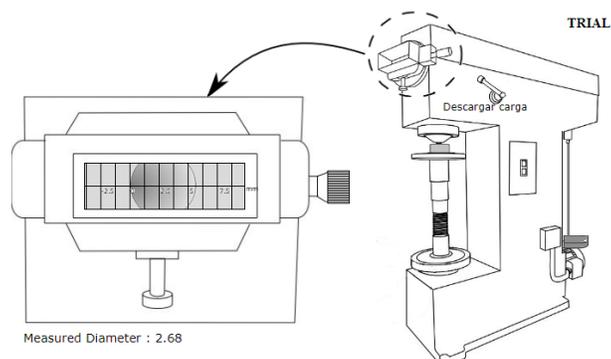
Diámetro de impresión latón.



Nota. Diámetro de impresión, Tomado de Prueba de dureza Brinell

Figura 29

Diámetro de impresión aluminio.



Nota. Diámetro de impresión, Tomado de Prueba de dureza Brinell

g. Paso 7.

Finalmente, la dureza del material se coloca en la tabla 24 para el acero dulce, en la tabla 25 para el latón y en la tabla 26 para el aluminio, ya que se realizan dos ensayos y se obtiene un promedio entre los dos valores obtenidos y se obtiene en valor de dureza del material.

Tabla 24

Dureza del acero dulce en escala Brinell.

Material	Diámetro indentador (mm)	Carga P (kg)	P/D^2	Diámetro de la muesca (mm)	Diámetro medio $d_i(mm)$	d/D	HBW (kg/mm²)	
Acero dulce	10	3000	30	4.6	4.6	4.6	0.46	170.49

Nota. Valor de dureza del acero dulce. Adaptado de Prueba de dureza Brinell

Dureza del latón en escala Brinell.

Tabla 25

Dureza del latón en escala Brinell.

Material	Diámetro indentador (mm)	Carga P (kg)	P/D^2	Diámetro de muesca (mm)	Diámetro la medio $d_i(mm)$	d/D	HBW (kg/mm²)	
Latón	10	1000	10	3.79	3.79	3.79	0.379	85.38

Nota. Valor de dureza del latón. Adaptado de Prueba de dureza Brinell

Tabla 26

Dureza del aluminio en escala Brinell.

Material	Diámetro indentador or (mm)	Carga P (kg)	P/ D^2 de muesca (mm)	Diámetro de la muesca d_i(mm)	Diámetro la medio d_i(mm)	d/D	HBW (kg/mm²)
Alumini o	10	500	5	2.68	2.68	2.68	0.26 8

Nota. Valor de dureza del aluminio. Adaptado de Prueba de dureza Brinell

Como se mencionó se debe de realizar otro ensayo para poder obtener un valor y obtener el promedio entre ambos, para de la dureza del acero dulce como se observa en la tabla 27, del latón como se observa en la tabla 28, del aluminio como se observa en la tabla 29.

Tabla 27

Valor promedio de dureza del acero dulce en escala Brinell.

Prueba	Material	Diámetro indentador (mm)	Carga P (kg)	Diámetro medio d_i(mm)	HBW (kg/mm²)	HBW promedio (kg/mm²)
1	Acero	10	3000	4.6	170.49	165.22
2	dulce			4.74	159.94	

Nota. Valor de dureza promedio del acero dulce. Adaptado de Prueba de dureza Brinell

Tabla 28

Valor promedio de dureza del latón en escala Brinell.

Prueba	Material	Diámetro indentador (mm)	Carga P (kg)	Diámetro medio $d_i(mm)$	HBW	HBW
					(kg/mm^2)	promedio (kg/mm^2)
1	Latón	10	1000	3.79	85.38	91.87
2				3.54	98.36	

Nota. Valor de dureza promedio del latón. Adaptado de Prueba de dureza Brinell

Valor promedio de dureza del aluminio en escala Brinell.

Prueba	Material	Diámetro indentador (mm)	Carga P (kg)	Diámetro medio $d_i(mm)$	HBW	HBW
					(kg/mm^2)	promedio (kg/mm^2)
1	Aluminio	10	500	2.68	87.06	83.34
2				2.8	79.62	

Nota. Valor de dureza promedio del aluminio. Adaptado de Prueba de dureza Brinell

3.1.3. Ensayo de Dureza Vickers.

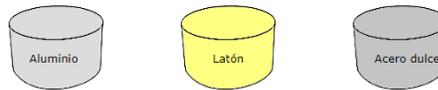
Para este modelo de ensayo se realizará de acuerdo a la norma ASTM E92-17.

a. Paso 1.

Seleccionar el material a ensayar, el laboratorio virtual cuenta con piezas de prueba como se observa en la figura 30.

Figura 30

Selección de materiales.



Nota. Materiales disponibles en el laboratorio virtual. Tomado de Prueba de dureza Vickers

b. Paso 2.

Luego de seleccionar el material la carga aplicada dependerá de la probeta a ensayar, como se observa en la tabla 30.

Tabla 30

Carga dependiendo del material a ensayar

Material	Carga a aplicar
Aluminio	10 kg
Latón	20 kg
Acero Dulce	30 kg

Nota. Carga aplicada dependiendo del material. Adaptado de Prueba de dureza Vickers

c. Paso 3.

La muestra seleccionada se coloca sobre una mesa de apoyo y la altura se ajusta girando el volante como se observa en la figura 31.

Figura 31

Regulación de altura del material.



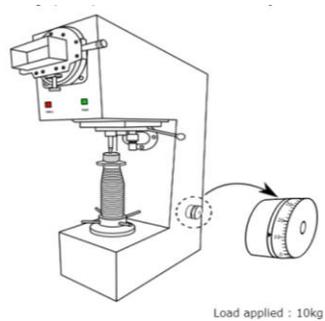
Nota. Regulación de la altura del material. Tomado de Prueba de dureza Vickers

d. Paso 4.

La carga aplicada se establece girando la perilla, para el aluminio la carga es de 10kg como se observa en la figura 32, para el latón la carga es de 20kg como se observa en la figura 33 y para el acero dulce la carga es de 30 kg en la figura 34.

Figura 32

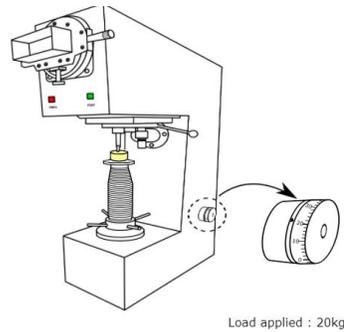
Ajuste de la carga a ejercer en el aluminio.



Nota. Ajuste de la carga a ejercer en el aluminio. Tomado de Prueba de dureza Vickers

Figura 33

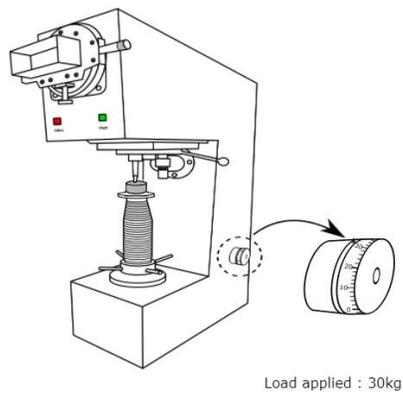
Ajuste de la carga a ejercer en el latón.



Nota. Ajuste de la carga a ejercer en el latón. Tomado de Prueba de dureza Vickers

Figura 34

Ajuste de la carga a ejercer en el acero dulce.



Nota. Ajuste de la carga a ejercer en el acero dulce. Tomado de Prueba de dureza Vickers

e. Paso 5.

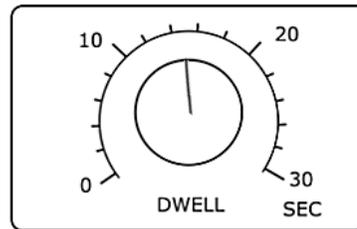
Se ajusta el tiempo hasta el cual se debe aplicar la carga a la muestra.

La carga aplicada durante un periodo de 10 a 15 seg como se observa en la figura 35.

Figura 35

Tiempo de aplicación de carga.

Time up to which load has to be applied = 15 sec



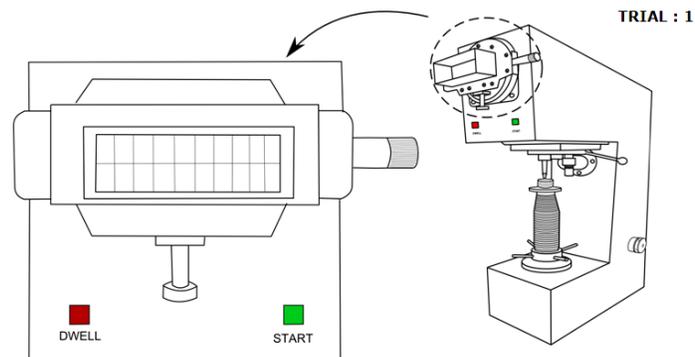
Nota Tiempo de aplicación de carga. Tomado de Prueba de dureza Vickers

f. Paso 6.

Aplicar la carga presionando el botón verde durante 2 o 3 segundos hasta que la luz roja se encienda como se observa en la Figura 36.

Figura 36

Aplicación de la carga.



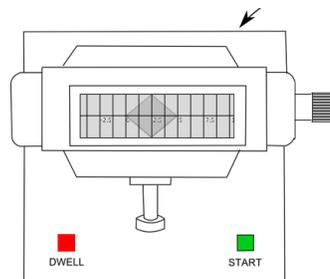
Nota Aplicación de la carga. Tomado de Prueba de dureza Vickers

g. Paso 7.

La imagen de la impresión se verá en la pantalla, se mide la longitud diagonal en la dirección X, para el acero dulce como se observa en la figura 37, para el latón como se observa en la figura 38 y para el aluminio como se observa en la figura 39.

Figura 37

Medición de la impresión en x para el acero dulce.

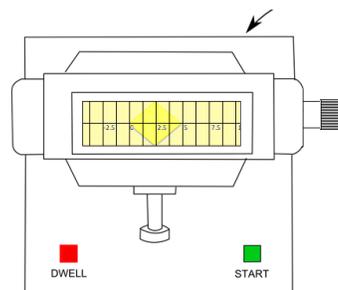


Indentation diagonal length in X-direction = 0.275mm

Nota. Medición de la impresión en x para el acero dulce. Tomado de Prueba de dureza Vickers

Figura 38

Medición de la impresión en x para el latón.

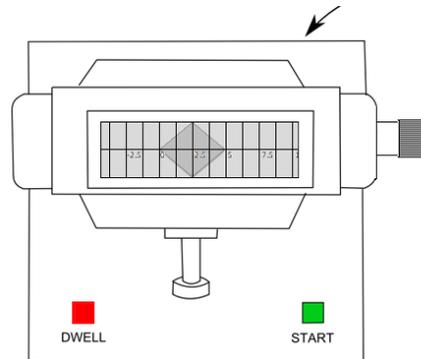


Indentation diagonal length in X-direction = 0.47mm

Nota. Medición de la impresión en x para el acero dulce. Tomado de *Prueba de dureza Vickers*

Figura 39

Medición de la impresión en x para el aluminio.



Indentation diagonal length in X-direction = 0.362mm

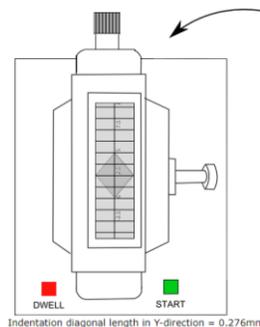
Nota. Medición de la impresión en x para el aluminio. Tomado de Prueba de dureza Vickers

h. Paso 8.

Se mide la longitud diagonal en la dirección Y, para el acero dulce como se observa en la figura 40, para el latón como se observa en la figura 41 y para el aluminio como se observa en la figura 42.

Figura 40

Medición de la impresión Y en el acero dulce.

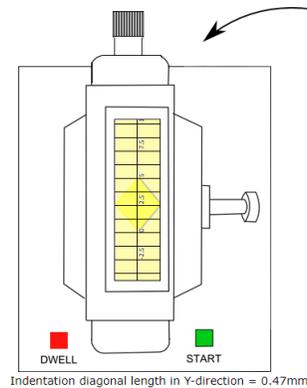


Indentation diagonal length in Y-direction = 0.276mm

Nota. Medición de la impresión Y en el acero dulce. Tomado de Prueba de dureza Vickers

Figura 41

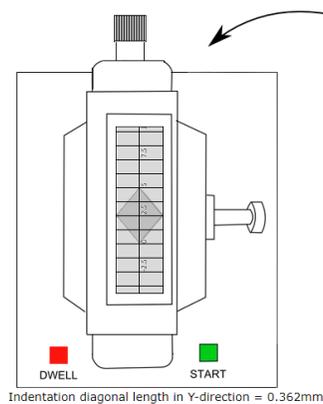
Medición de la impresión Y en el latón.



Nota. Medición de la impresión Y en el latón. Tomado de Prueba de dureza Vickers

Figura 42

Medición de la impresión Y en el aluminio.



Nota. Medición de la impresión Y en el aluminio. Tomado de Prueba de dureza Vickers

En la tabla 31 se observan los valores de indentación generados por el indentador, en las probetas de aluminio, acero dulce y latón.

Tabla 31

Valores de Dureza.

Material	Diagonal de indentación	
	En el eje X	En el eje Y
Aluminio	0,362	0,362
Latón	0,47	0,47
Acero dulce	0,275	0,276

Nota. En la tabla se observan los valores de diagonal de indentación de dureza Vickers obtenidos en el laboratorio virtual

i. Paso 9.

Finalmente, la dureza del material se coloca en una tabla ya que se realizan dos ensayos y se obtiene un promedio entre los dos valores obtenidos y se obtiene un valor de dureza del acero dulce como se observa en la tabla 32, del latón como se observa en la tabla 33 y del aluminio como se observa en la tabla 34.

Tabla 32

Dureza del acero dulce ensayo Vickers.

Muestra	Carga Aplicada en kg	Diagonal de indentación en mm		Longitud de diagonal media d en mm	Numero de dureza Vickers
		D1	D2		
Acero dulce	30	0.275	0.276	0.2755	732.80

Nota. Valor de dureza del acero dulce. Adaptado de Prueba de dureza Vickers

Tabla 33

Dureza del latón ensayo Vickers.

Muestra	Carga Aplicada en kg	Diagonal de indentación en mm		de Longitud en diagonal media d en mm	Numero de dureza Vickers
		D1	D2		
Latón	20	0.47	0.47	0.47	167.86

Nota. Valor de dureza del latón. Adaptado de Prueba de dureza Vickers

Tabla 34

Dureza del aluminio ensayo Vickers.

Muestra	Carga Aplicada en kg	Diagonal de indentación en mm		de Longitud en diagonal media d en mm	Numero de dureza Vickers
		D1	D2		
Aluminio	10	0.362	0.362	0.362	141.48

Nota. Valor de dureza del aluminio. Adaptado de Prueba de dureza Vickers

Como se mencionó se debe de realizar otro ensayo para poder obtener un valor y obtener el promedio entre ambos y tener el valor de la dureza del acero dulce como se observa en la tabla 35, del latón como se observa en la tabla 36 y del aluminio como se observa en la tabla 37.

Tabla 35

Valor promedio de dureza del acero dulce ensayo Vickers.

Prueba	Muestra	Carga Aplicada en kg	Diagonal de indentación en mm	Numero de dureza Vickers	Numero de dureza Vickers Promedio
1	Acero	30	0.2755	732.80	
2	dulce		0.2715	754.56	743.68

Nota. Valor de dureza promedio del acero dulce. Adaptado de Prueba de dureza Vickers

Tabla 36

Valor promedio de dureza del latón ensayo Vickers.

Prueba	Muestra	Carga Aplicada en kg	Diagonal de indentación en mm	Numero de dureza Vickers	Numero de dureza Vickers Promedio
1	Latón	20	0.47	167.86	
2			0.463	172.97	170.42

Nota. Valor de dureza promedio del acero dulce latón. Adaptado de Prueba de dureza Vickers

Tabla 37

Valor promedio de dureza del aluminio ensayo Vickers.

Prueba	Muestra	Carga Aplicada en kg	Diagonal de indentación en mm	Numero de dureza Vickers	Numero de dureza Vickers Promedio
1	Aluminio	10	0.362	141.48	
2			0.3595	143.45	142.47

Nota. Valor de dureza promedio del aluminio. Adaptado de Prueba de dureza Vickers

3.2 Software CAD

3.2.1 Simulación ensayo de dureza Brinell.

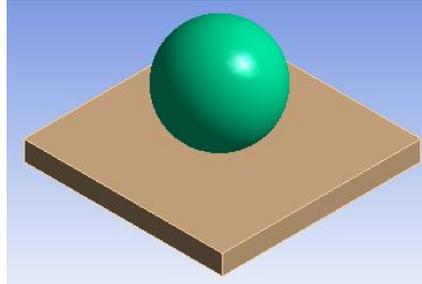
Para este modelo de ensayo se realizará de acuerdo a la norma ASTM E10-15.

a. Paso 1

Se debe diseñar una esfera que simulará el indentador de 10 mm, para la probeta un bloque sólido de un espesor diferente como se observa en la tabla 3, este depende del diámetro de indentación, en el aluminio de 2 mm, en el latón de 3,8 mm y en el acero dulce de 6,1 mm cómo se observa en la figura 43.

Figura 43

Indentador y Probeta ensayo Brinell.



Nota. En la imagen se observa la generación de la probeta y del indentador que serán empleados en la simulación.

b. Paso 2

Una vez ya generadas las piezas se debe introducir el material de cada parte. En este el ensayo se generará mediante el programa ANSYS Workbench, las propiedades mecánicas que se ingresaron en el software se observan en la tabla 38.

Tabla 38

Propiedades mecánicas de materiales.

Material	Aluminio (6060 - T6)	Latón (C37733)	Acero dulce (ASTM A36)	Diamante	Carburo de tungsteno
Propiedad					
Densidad (kg/m ³)	2700	8530	7850	3500	14500
Módulo de Young (GPa)	69,5	110	200	1050	600
Radio de	0,33	0,35	0,26	0,18	0,22

Material	Aluminio (6060 T6)	Latón (C37733)	Acero dulce (ASTM A36)	Diamante	Carburo de tungsteno
Propiedad					
poisson					
Módulo de volumen (Gpa)	68,13	122,2	133,88	546,88	357,14
Módulo de corte (Gpa)	26,12	40,74	79,36	444,92	245,9
Resistencia a la tracción (Mpa)	165,47	367,4	250	19305	344,8
Resistencia última a la tracción (Mpa)	220,63	502	500	20202	370

Nota. En la tabla se presentan valores de las propiedades mecánicas los materiales que intervienen en las simulaciones de ensayo de dureza.

El material será introducido directamente desde ahí como se observa en la figura 44, de carburo de tungsteno para indentadores de bola, diamante para indentador de pirámide, de latón, acero dulce y aluminio para las probetas de prueba.

Figura 44

Materiales para probetas e indentadores.

Material			
3	acero dulce (ASTM A36)	General	PROPIEDADES MECANICAS DEL ACERO DULCE
4	ALUMINIO(6060 T6)	Granta	Aluminum, 6060, T6, wrought Data compiled by the Granta Design team at ANSYS, incorporating various sources including JAHM and MagWeb. ANSYS Inc. provides no warranty for this data.
5	Carburo de tungsteno	General	PROPIEDADES MECANICAS DEL CARBURO DE TUNGSTENO
6	DIAMANTE	General	PROPIEDADES MECANICAS DEL DIAMANTE
7	LATON	Granta	Brass, CuZn39Pb2, C37700, (cold worked), (lead) (clock) brass, wrought Data compiled by the Granta Design team at ANSYS, incorporating various sources including JAHM and MagWeb. ANSYS Inc. provides no warranty for this data.

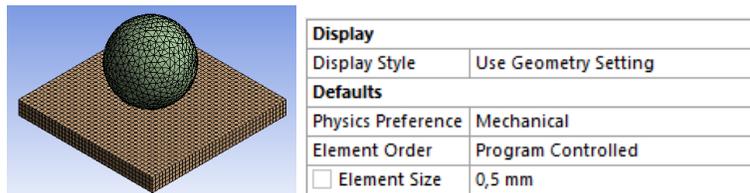
Nota. En la imagen se observa la implementación del material de la probeta y del indentador que serán empleados en la simulación.

c. Paso 3.

Una vez ingresados los materiales, se genera una malla como observa en la figura 45. El Programa ANSYS nos da la facultad de generar una malla de 0,5 mm para poder apreciar la huella final.

Figura 45

Malla generada ensayo Brinell.



Nota. En la imagen se observa la malla de la probeta y del indentador que serán empleados en la simulación.

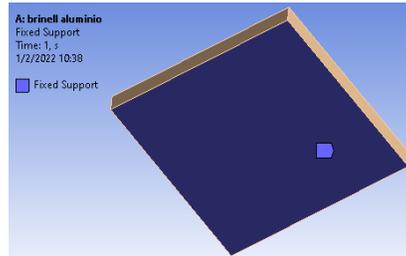
d. Paso 4.

Para finalizar antes de proceder a la resolución del ensayo debe asignarse que partes no podrán moverse, es decir, que parte hará el rol de

base. Se debe fijar la cara inferior de la probeta, como se observa en la figura 46. Luego se le indica al programa que fuerza actuará sobre la esfera, para ello se introduce una fuerza vectorial que actuara sobre el eje Y en este caso como se observa en la figura 47 para el aluminio es de $500 \text{ kgf} * \frac{9.81N}{1\text{kgf}} = 4905 \text{ N}$, figura 48 para el latón $1000 \text{ kgf} * \frac{9.81N}{1\text{kgf}} = 9810 \text{ N}$ y figura 49 para el acero dulce $3000 \text{ kgf} * \frac{9.81N}{1\text{kgf}} = 29430 \text{ N}$.

Figura 46

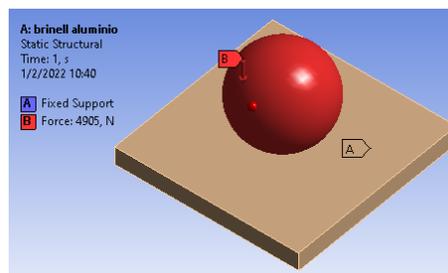
Soporte Fijo de la probeta.



Nota. En la imagen se observa el soporte fijo de la probeta en la simulación.

Figura 47

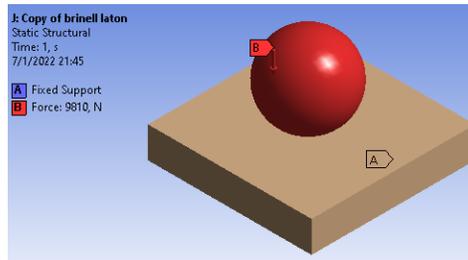
Fuerza aplicada al aluminio.



Nota. En la imagen se observa la fuerza aplicada a la probeta de aluminio en la simulación.

Figura 48

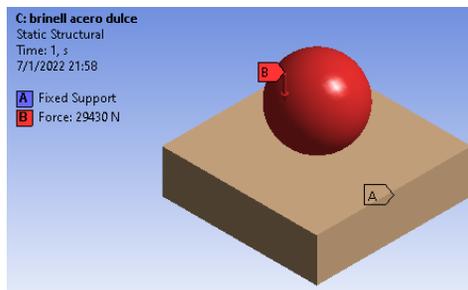
Fuerza aplicada al latón.



Nota. En la imagen se observa la fuerza aplicada a la probeta de latón en la simulación.

Figura 49

Fuerza aplicada al acero dulce.



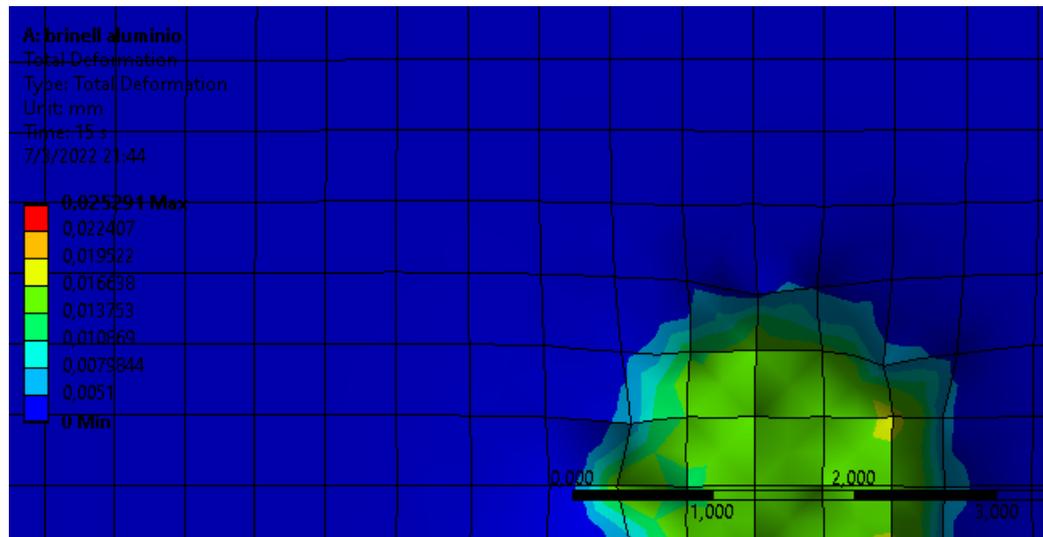
Nota. En la imagen se observa la fuerza aplicada a la probeta de acero dulce en la simulación.

e. Paso 5.

Una vez introducidos todos los datos ya se puede proceder a resolver el sistema, luego se miden los diámetros de las indentaciones considerando la medición desde los puntos de color celeste en cada simulación, tomando en cuanto eso, se observa en la figura 50 para el aluminio la indentación es de 2,75 mm, figura 51 para el latón la indentación es de 3,55 mm, figura 52 para el acero dulce la indentación es de 4,75 mm.

Figura 50

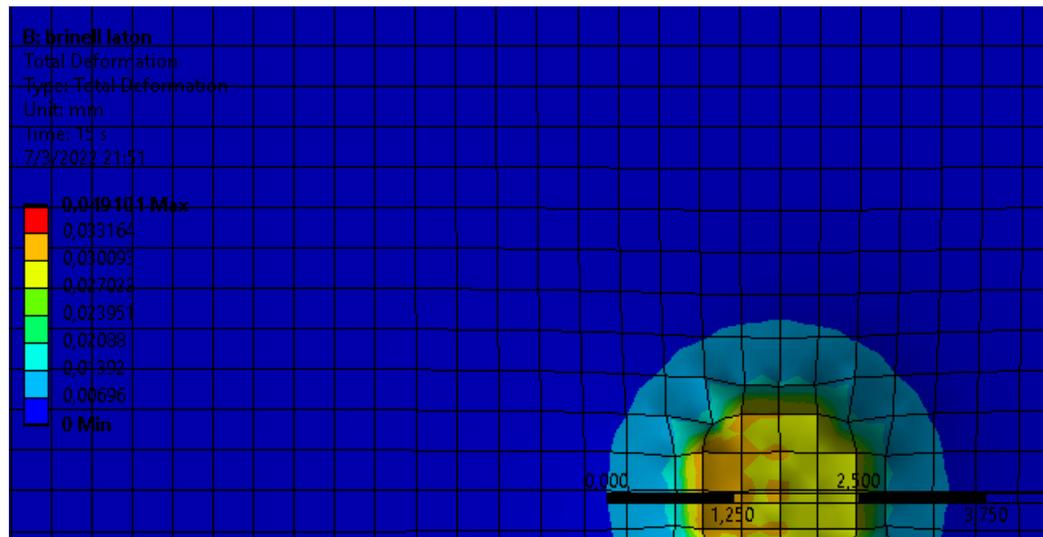
Diámetro de indentación en Aluminio.



Nota. En la imagen se observa la deformación total a la probeta de aluminio en la simulación.

Figura 51

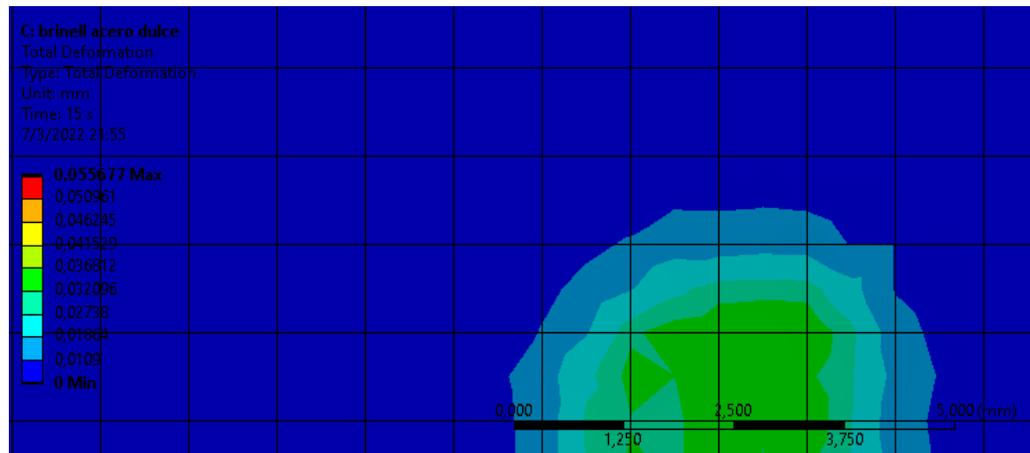
Diámetro de indentación en latón.



Nota. En la imagen se observa la deformación total a la probeta de latón en la simulación.

Figura 52

Diámetro de indentación en acero dulce.



Nota. En la imagen se observa la deformación total a la probeta de acero dulce en la simulación.

f. Paso 6.

Se procede al cálculo de dureza de materiales, tomando en cuenta la fuerza aplicada, el diámetro del indentador y la indentación generada.

Nota: La fuerza aplicada debe estar en kgf, el diámetro del indentador y la huella de indentación deben de estar en mm.

Cálculo de dureza aluminio:

$$HB - Aluminio = \frac{2 * F}{\pi * D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$$HB - Aluminio = 0,102 * \frac{2 * 500}{\pi * 10(10 - \sqrt{10^2 - 2.75^2})} = 82,55 \frac{kgf}{mm^2}$$

Cálculo de dureza latón:

$$HB - laton = \frac{2 * F}{\pi * D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$$HB - laton = \frac{2 * 1000}{\pi * 10(10 - \sqrt{10^2 - 3.55^2})} = 97,74 \frac{kgf}{mm^2}$$

Cálculo de dureza acero dulce:

$$HB - \text{Acero dulce} = \frac{2 * F}{\pi * D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$$HB - \text{Acero dulce} = \frac{2 * 3000}{\pi * 10(10 - \sqrt{10^2 - 4.75^2})} = 159,13 \frac{kgf}{mm^2}$$

3.2.2 Simulación ensayo de dureza Rockwell.

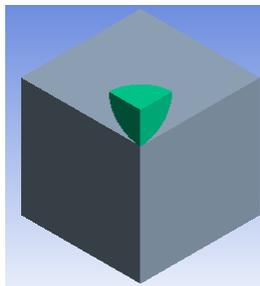
Para este modelo de ensayo se realizará de acuerdo a la norma ASTM E18-15.

a. Paso 1.

Se debe diseñar una esfera que simulará el indentador de 1,58 mm de diámetro, para la probeta un bloque sólido de 3 mm de espesor para evitar que la deformación se extienda a la superficie opuesta del espécimen, como se observa en la figura 53, pero para esta simulación se la seccionara en $\frac{1}{4}$, para poder observar la profundidad de indentación ya que este parámetro es el principal para la obtención de la dureza en este tipo de ensayo.

Figura 53

Indentador y Probeta ensayo Rockwell.



Nota. En la imagen se observa la generación de la probeta y del indentador que serán empleados en la simulación.

b. Paso 2.

Una vez ya generadas las piezas se debe introducir el material de cada parte. En este el ensayo se generará mediante el programa ANSYS

Workbench, las propiedades mecánicas que se ingresaron en el software se observan en la tabla 43.

El material será introducido directamente desde ahí como se observa en la figura 54, de carburo de tungsteno para indentadores de bola, diamante para indentador de pirámide, de latón, acero dulce y aluminio para las probetas de prueba.

Figura 54

Materiales para probetas e indentadores.

2	Material			
3	 acero dulce (ASTM A36)	<input type="checkbox"/>	General	PROPIEDADES MECANICAS DEL ACERO DULCE
4	 ALUMINIO (6060 T6)	<input type="checkbox"/>	Granta	Aluminum, 6060, T6, wrought Data compiled by the Granta Design team at ANSYS, incorporating various sources including JAHM and MagWeb. ANSYS Inc. provides no warranty for this data.
5	 Carburo de tungsteno	<input type="checkbox"/>	General	PROPIEDADES MECANICAS DEL CARBURO DE TUGSTENO
6	 DIAMANTE	<input type="checkbox"/>	General	PROPIEDADES MECANICAS DEL DIAMANTE
7	 LATON	<input type="checkbox"/>	Granta	Brass, CuZn39Pb2, C37700, (cold worked), (leaded (clock) brass), wrought Data compiled by the Granta Design team at ANSYS, incorporating various sources including JAHM and MagWeb. ANSYS Inc. provides no warranty for this data.

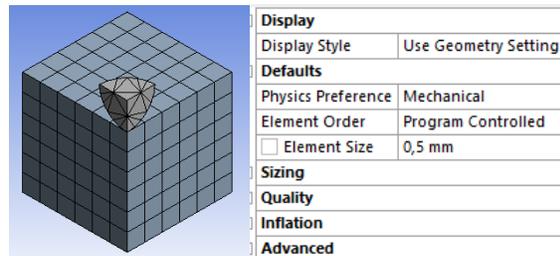
Nota. En la imagen se observa la implementación del material de la probeta y del indentador que serán empleados en la simulación.

c. Paso 3.

Una vez ingresados los materiales, se genera una malla como observa en la figura 55. El Programa ANSYS nos da la facultad de generar una malla de 0,5 mm para apreciar la huella final.

Figura 55

Malla generada ensayo Rockwell.



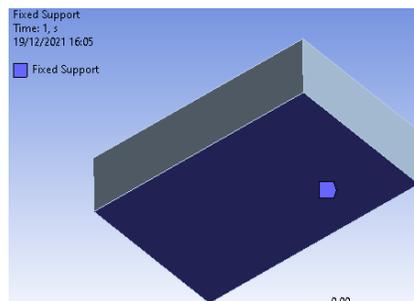
Nota. En la imagen se observa la malla de la probeta y del indentador que serán empleados en la simulación.

d. Paso 4.

Para finalizar antes de proceder a la resolución del ensayo debe asignarse que partes no podrán moverse, es decir, que parte hará el rol de base. Se debe fijar la cara inferior de la probeta, como se observa en la figura 56. Luego se le indica al programa que fuerza actuara sobre la esfera, para ello se introduce una fuerza vectorial preliminar de $10 \text{ kgf} * \frac{9.81N}{1\text{kgf}} = 98,1N$ que actuara sobre el eje Y en las 3 probetas como se observa en la figura 57 para el aluminio, latón y acero dulce y una fuerza total de $100 \text{ kgf} * \frac{9.81N}{1\text{kgf}} = 981N$ para el aluminio, latón y acero dulce cómo se observa en la figura 58.

Figura 56

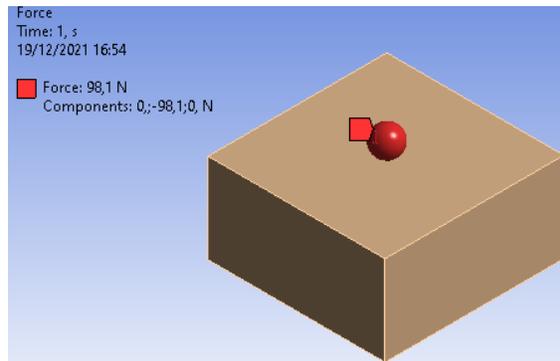
Soporte Fijo de la probeta.



Nota. En la imagen se observa el soporte fijo de la probeta en la simulación.

Figura 57

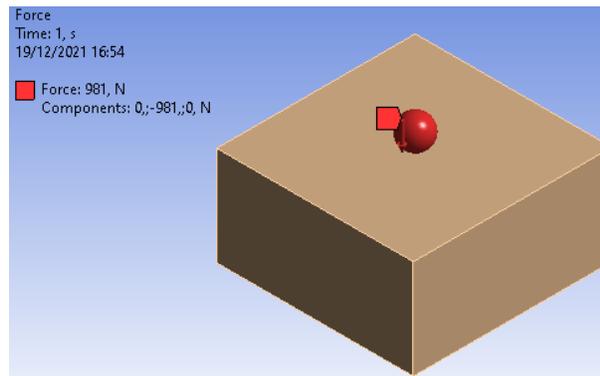
Fuerza preliminar aplicada a las probetas.



Nota. En la imagen se observa la fuerza preliminar aplicada a las probetas en la simulación.

Figura 58

Fuerza total aplicada a las probetas.



Nota. En la imagen se observa la fuerza aplicada a la probeta de latón en la simulación.

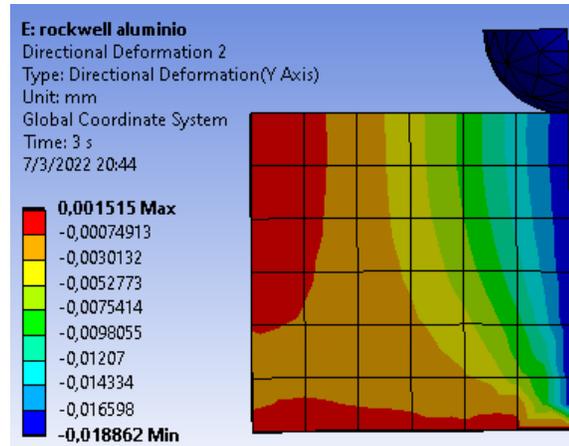
e. Paso 5.

Ahora que ya se han introducido todos los datos, se procede a resolver el sistema, y a obtener valor de deformación de la probeta una vez aplicada la fuerza preliminar como se observa en la figura 59 para el aluminio, figura 60 para el latón, figura 61 para el acero dulce considerando solo la fuerza preliminar de 10kg y, luego se debe proceder a aplicar la carga total por 10

seg y luego volver a aplicar 100 kg y observar la deformación total en la probeta, en la figura 62 para el aluminio, figura 63 para el latón, figura 64 para el acero dulce considerando la deformación total de la probeta.

Figura 59

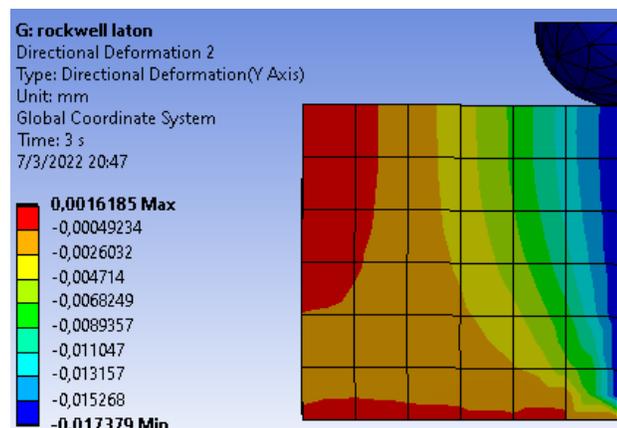
Deformación superficial probeta de aluminio.



Nota. En la imagen se observa la fuerza aplicada a la probeta de aluminio en la simulación.

Figura 60

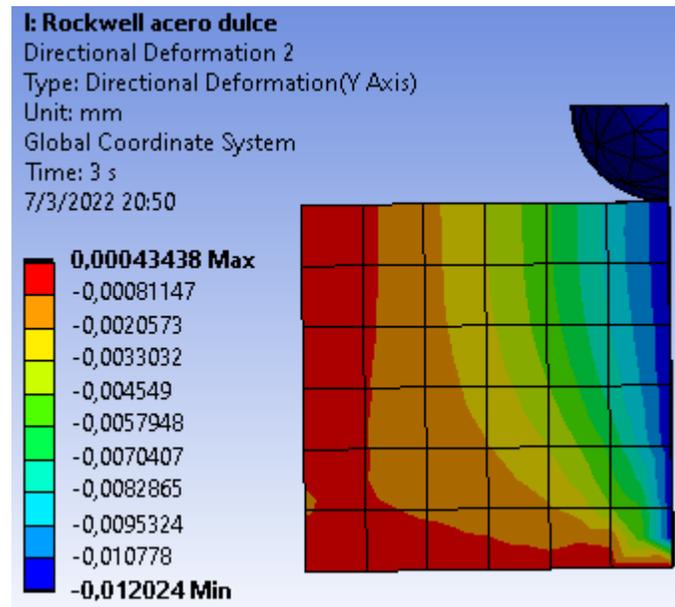
Deformación superficial probeta de latón.



Nota. En la imagen se observa la fuerza aplicada a la probeta de latón en la simulación.

Figura 61

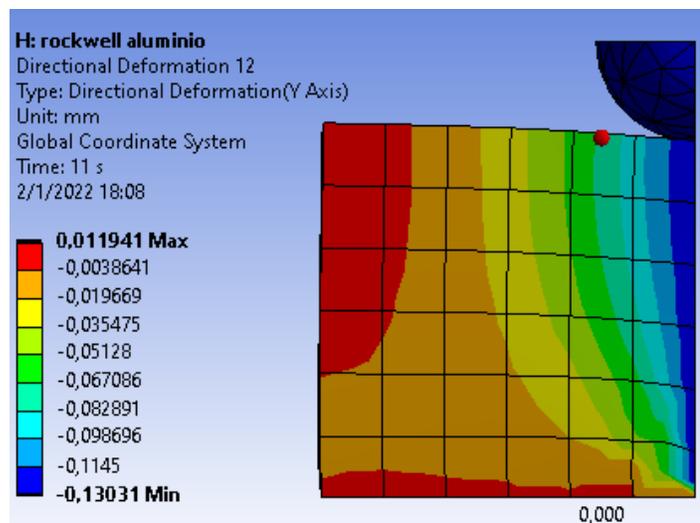
Deformación superficial probeta de acero dulce.



Nota. En la imagen se observa la fuerza aplicada a la probeta de acero dulce en la simulación.

Figura 62

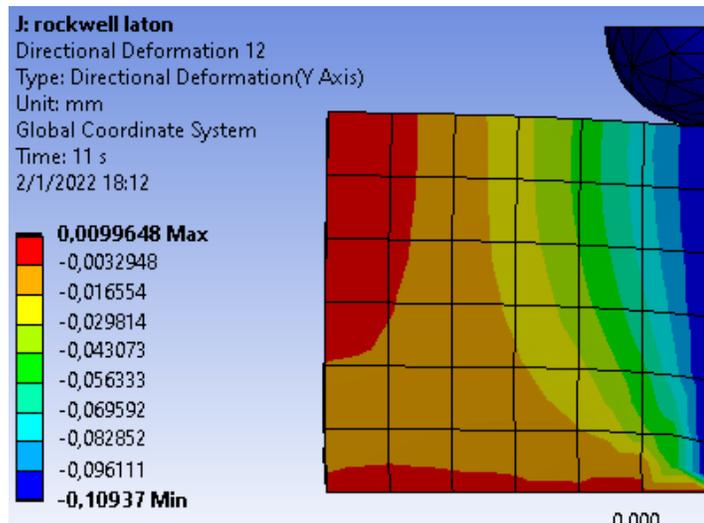
Deformación total probeta de aluminio.



Nota. En la imagen se observa la fuerza aplicada a la probeta de aluminio en la simulación.

Figura 63

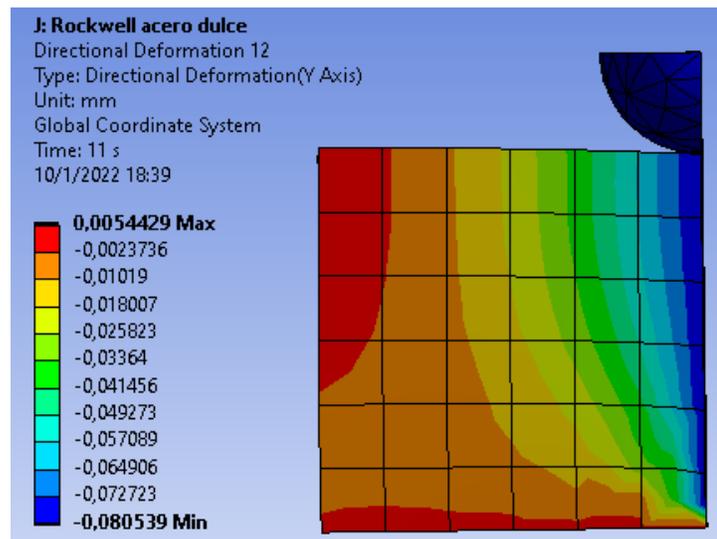
Deformación total probeta de latón.



Nota. En la imagen se observa la fuerza aplicada a la probeta de latón en la simulación

Figura 64

Deformación total probeta de acero dulce



Nota. En la imagen se observa la fuerza aplicada a la probeta de acero dulce en la simulación.

En la tabla 39 se observa las profundidades de indentación en las

probetas de aluminio, latón y acero dulce, al momento de aplicar la carga de 10kg y la de 100 kg respectivamente.

Tabla 39

Profundidad de indentación ensayo Rockwell.

Profundidad de indentación	Fuerza aplicada	
	10 kg	100 kg
Material		
Aluminio	0,018 mm	0,13 mm
Latón	0,017 mm	0,10 mm
Acero dulce	0,012 mm	0,08 mm

Nota. En la tabla se observa la profundidad de indentación obtenidos en el ensayo Vickers obtenidos en el software CAD.

f. Paso 6.

Cálculo de dureza de materiales:

Nota: Las profundidades de indentación ($h - h_o$) deben de estar en mm.

Cálculo de dureza aluminio:

$$HRB - Aluminio = 130 - \frac{h - h_o}{0.002}$$

$$HRB - Aluminio = 130 - \frac{0.1303 - 0.018864}{0.002} = 74.282$$

Cálculo de dureza latón:

$$HRB - laton = 130 - \frac{h - h_o}{0.002}$$

$$HRB - laton = 130 - \frac{0.10937 - 0.017383}{0.002} = 84.0065$$

Cálculo de dureza acero dulce:

$$HRB - \text{acero dulce} = 130 - \frac{h - h_o}{0.002}$$

$$HRB - \text{acero dulce} = 130 - \frac{0.08053 - 0.012018}{0.002} = 95.744$$

3.2.2 Simulación ensayo de dureza Vickers

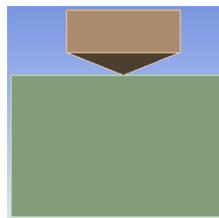
Para este modelo de ensayo se realizará de acuerdo a la norma ASTM E92-17.

a. Paso 1 .

Para este modelo de ensayo se empleará un indentador de diamante piramidal de 136° de cara para el aluminio, latón y acero dulce y una probeta que debe ser mínimo de 1.5 veces de espesor, la diagonal de indentación. En este caso se empleará una de 10 mm a ensayar de material de acero dulce, latón y aluminio como se observa en la figura 65.

Figura 65

Indentador y Probeta ensayo vickers.



Nota. En la imagen se observa la generación de la probeta y del indentador que serán empleados en la simulación.

b. Paso 2.

Una vez ya generadas las piezas se debe introducir el material de cada parte. En este el ensayo se generará mediante el programa ANSYS Workbench, las propiedades mecánicas que se ingresaron en el software se observan en la tabla 43.

El material será introducido directamente desde ahí como se observa en la figura 66, de carburo de tungsteno para indentadores de bola, diamante para indentador de pirámide, de latón, acero dulce y aluminio para las probetas de prueba.

Figura 66

Materiales para probetas e indentadores.

Material					
3	acero dulce (ASTM A36)			General	PROPIEDADES MECANICAS DEL ACERO DULCE
4	ALUMINIO(6060 T6)			Granta	Aluminum, 6060, T6, wrought Data compiled by the Granta Design team at ANSYS, incorporating various sources including JAHM and MagWeb. ANSYS Inc. provides no warranty for this data.
5	Carburo de tungsteno			General	PROPIEDADES MECANICAS DEL CARBURO DE TUNGSTENO
6	DIAMANTE			General	PROPIEDADES MECANICAS DEL DIAMANTE
7	LATON			Granta	Brass, CuZn39Pb2, C37700, (cold worked), (lead) (clock) brass, wrought Data compiled by the Granta Design team at ANSYS, incorporating various sources including JAHM and MagWeb. ANSYS Inc. provides no warranty for this data.

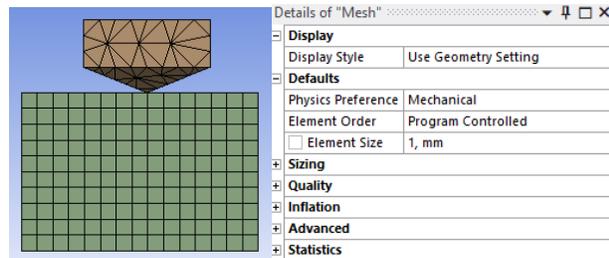
Nota. En la imagen se observa la implementación del material de la probeta y del indentador que serán empleados en la simulación.

c. Paso 3.

Una vez ingresados los materiales, se genera una malla como observa en la figura 67. El Programa ANSYS nos permite generar una malla de 1mm para poder más adelante apreciar la huella final.

Figura 67

Malla generada.



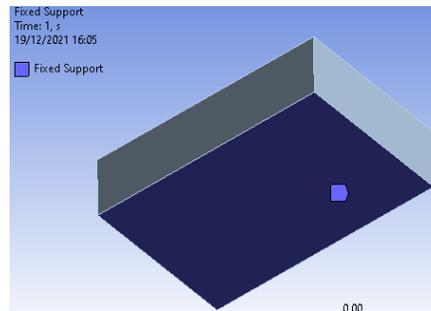
Nota. En la imagen se observa la malla de la probeta y del indentador que serán empleados en la simulación.

d. Paso 4.

Para finalizar antes de proceder a la resolución del ensayo debe asignarse que partes no podrán moverse, es decir, que parte hará el rol de base. Se debe fijar la cara inferior de la probeta, como se observa en la figura 68. Luego se le indica al programa que fuerza actuará sobre la esfera, para ello se introduce una fuerza vectorial de $10 \text{ kgf} * \frac{9.81N}{1\text{kgf}} = 98.1N$ que actuará sobre el, como se observa en la figura 69 para el aluminio, $20 \text{ kgf} * \frac{9.81N}{1\text{kgf}} = 196.2N$ que actuará sobre el, como se observa en la figura 70 para el latón y $30 \text{ kgf} * \frac{9.81N}{1\text{kgf}} = 294.3N$ que actuará sobre él, como se observa en la figura 71 para el acero dulce.

Figura 68

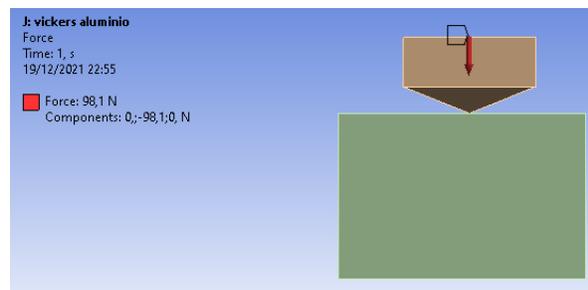
Soporte Fijo de la probeta.



Nota. En la imagen se observa el soporte fijo de la probeta en la simulación.

Figura 69

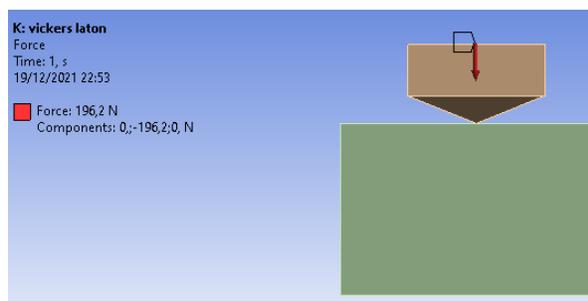
Fuerza aplicada al aluminio.



Nota. En la imagen se observa la fuerza aplicada a la probeta de aluminio en la simulación.

Figura 70

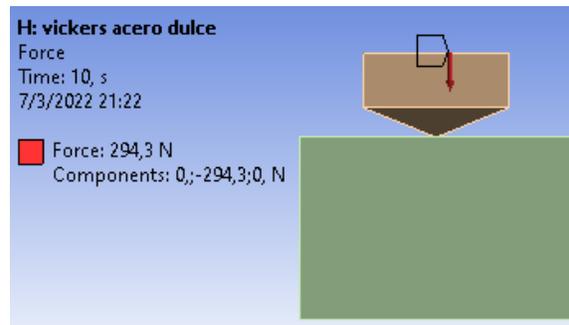
Fuerza aplicada al latón.



Nota. En la imagen se observa la fuerza aplicada a la probeta de latón en la simulación.

Figura 71

Fuerza aplicada al acero dulce.



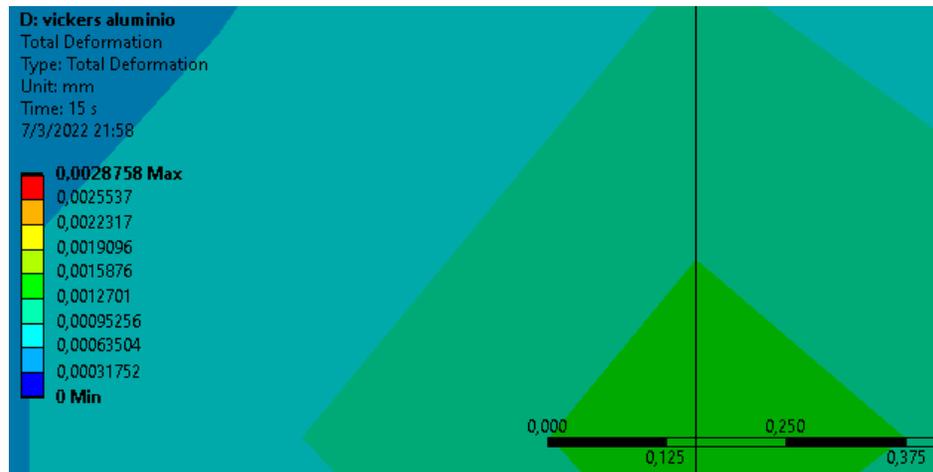
Nota. En la imagen se observa la fuerza aplicada a la probeta de latón en la simulación.

e. Paso 5.

Ahora que ya se han introducido todos los datos ya se puede proceder a medir la distancia de la diagonal de indentación con respecto al eje x como se observa en la figura 72 para el aluminio, figura 73 para el latón, figura 74 para el acero dulce, luego medir la distancia de la diagonal de indentación con respecto al eje z como se observa en la figura 75 para el aluminio, figura 76 para el latón, figura 77 para el acero dulce, en la tabla 44 se observa estos valores de indentación.

Figura 72

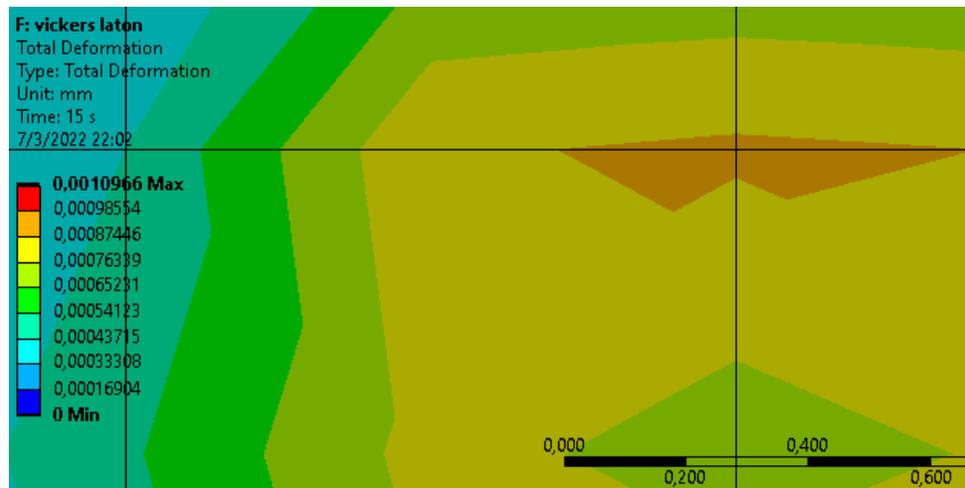
Longitud de diagonal respecto al eje x del aluminio.



Nota. En la imagen se observa la longitud de la diagonal en la probeta de aluminio causa por el indentador vickers.

Figura 73

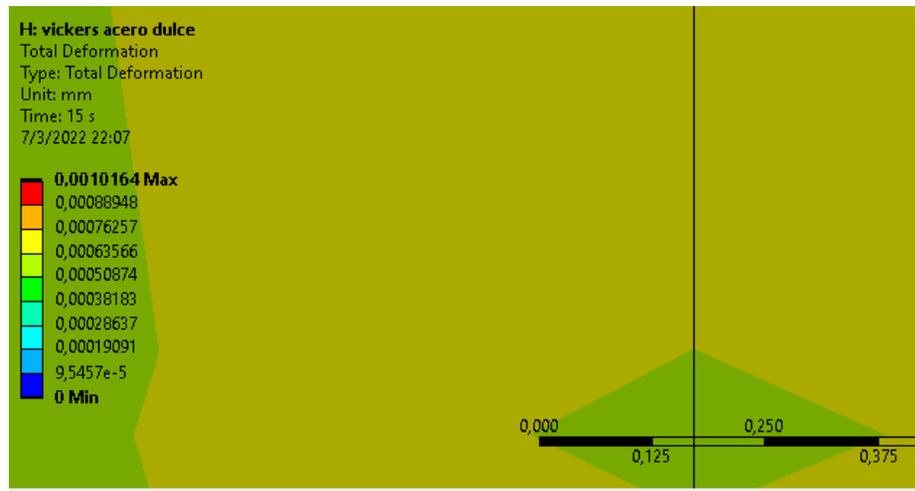
Longitud de diagonal respecto al eje x del latón.



Nota. En la imagen se observa la longitud de la diagonal en la probeta de aluminio causa por el indentador vickers.

Figura 74

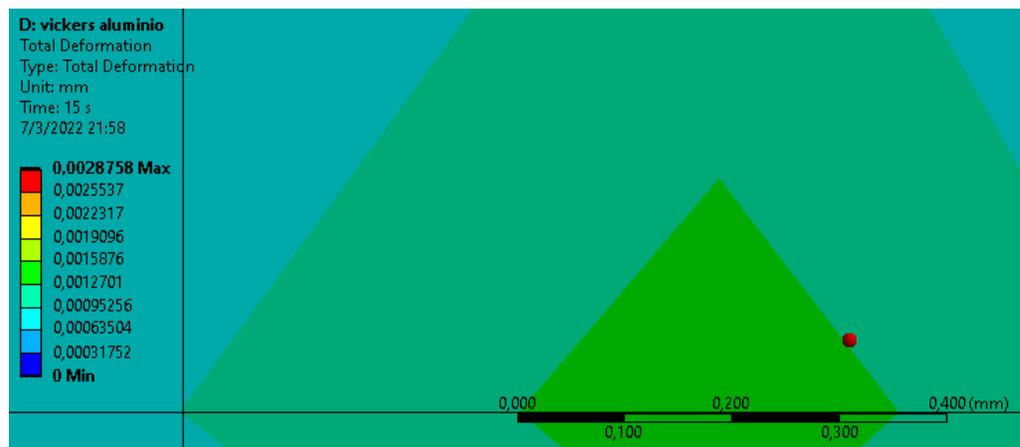
Longitud de diagonal respecto al eje x del acero dulce.



Nota. En la imagen se observa la longitud de la diagonal en la probeta de aluminio causa por el indentador Vickers.

Figura 75

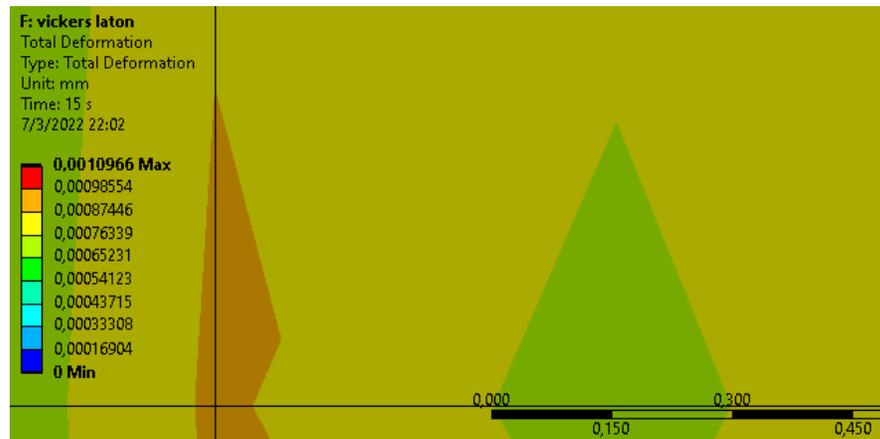
Longitud de diagonal respecto al eje z del aluminio.



Nota. En la imagen se observa la longitud de la diagonal en la probeta de aluminio causa por el indentador vickers.

Figura 76

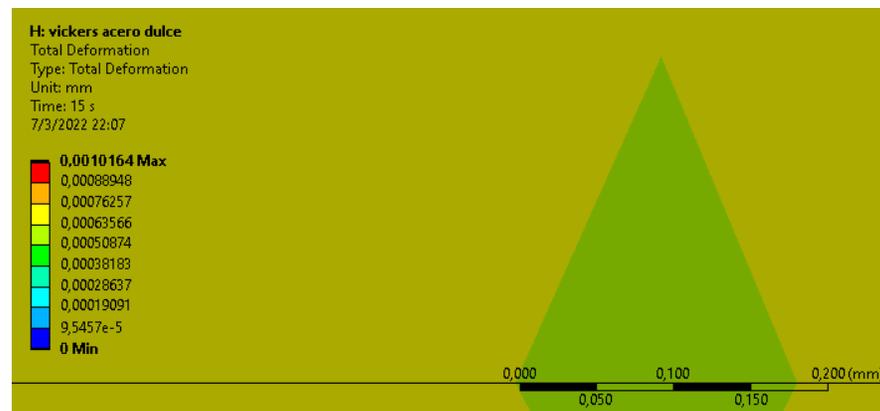
Longitud de diagonal respecto al eje z del latón.



Nota. En la imagen se observa la longitud de la diagonal en la probeta de aluminio causa por el indentador vickers.

Figura 77

Longitud de diagonal respecto al eje z del acero dulce.



Nota. En la imagen se observa la longitud de la diagonal en la probeta de aluminio H causa por el indentador vickers.

En la tabla 40 se observa las diagonales de indentación en las probetas de aluminio, latón y acero dulce, al momento de aplicar las cargas respectivamente a cada material.

Tabla 40

Profundidad de indentación ensayo Vickers.

	Diagonal de indentación	Eje de análisis	
		X	Z
Material			
Aluminio	0,375 mm	0,35 mm	
Latón	0,625 mm	0,29 mm	
Acero dulce	0,375 mm	0,175 mm	

Nota. En la tabla se observa la profundidad de indentación obtenidos en el ensayo Vickers obtenidos en el software CAD.

f. Paso 6.

Cálculo de dureza de materiales.

Nota: Las diagonales de indentación ($d1 - d2$) deben estar en mm y la fuerza aplicada debe estar en Newtons.

Aluminio:

Cálculo del valor promedio de la longitud de indentación.

$$d = \frac{d1 + d2}{2}$$

$$d = \frac{0.35 + 0.375}{2} = 0.3625mm$$

Cálculo de la dureza:

$$HRV \text{ aluminio} = \frac{0,1891 * F}{d^2}$$

$$HRV \text{ aluminio} = \frac{0,1891 * 98,1}{(0.345)^2} = 141,17 \frac{N}{mm^2}$$

Latón:

Cálculo del valor promedio de la longitud de indentación.

$$d = \frac{d1 + d2}{2}$$

$$d = \frac{0.625 + 0.29}{2} = 0.4575mm$$

Cálculo de la dureza:

$$HRV \text{ laton} = \frac{0,1891 * F}{d^2}$$

$$HRV \text{ laton} = \frac{0,1891 * 196.2}{(0.4575)^2} = 177.25 \frac{N}{mm^2}$$

Acero dulce:

Cálculo del valor promedio de la longitud de indentación.

$$d = \frac{d1 + d2}{2}$$

$$d = \frac{0.375 + 0.175}{2} = 0.275 mm$$

Cálculo de la dureza:

$$HRV \text{ acero dulce} = \frac{0,1891 * F}{d^2}$$

$$HRV \text{ dulce} = \frac{0,1891 * 294.3}{(0.275)^2} = 735.89 \frac{N}{mm^2}$$

Capítulo IV

4. Resultados y discusión

4.1. Datos obtenidos en laboratorio virtual

En la tabla 41 se exponen los valores de dureza en escala Rockwell, Brinell y Vickers del acero dulce, latón y aluminio respectivamente.

Tabla 41

Valores de Dureza Totales.

Material	Escala de dureza		
	Rockwell (B)	Brinell	Vickers
Acero dulce	89	165.22	743.68
Latón	78.5	91.87	170.42
Aluminio	70.5	83.34	142.47

Nota. Valores de dureza obtenidos mediante laboratorio virtual. Adaptado de Ensayos de Dureza

4.1.1. Verificación de datos Obtenidos.

A continuación, se realiza la verificación de los valores de dureza obtenidos en el laboratorio virtual mediante la aplicación de fórmulas.

Verificación dureza Rockwell:

La comprobación de estos valores no se puede realizar debido a que Virtual Labs no proporciona valores de profundidad de indentación, directamente arrojar el valor de dureza.

Verificación dureza Brinell:

Cálculo de dureza aluminio:

Primer ensayo:

$$HB - Aluminio = \frac{2 * F}{\pi * D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$$HB - Aluminio = \frac{2 * 500}{\pi * 10(10 - \sqrt{10^2 - 2,68^2})} = 87,01 \frac{kgf}{mm^2}$$

Segundo ensayo:

$$HB - Aluminio = \frac{2 * F}{\pi * D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$$HB - Aluminio = \frac{2 * 500}{\pi * 10(10 - \sqrt{10^2 - 2,8^2})} = 79,57 \frac{kgf}{mm^2}$$

Se obtiene el valor promedio de dureza Brinell:

$$HB - Aluminio - Promedio = \frac{87,01 + 79,57}{2} = 83,29 \frac{kgf}{mm^2}$$

En el laboratorio virtual se obtuvo un valor de 83,34, en los cálculos realizados un valor de 83,29 obteniendo una diferencia de 0,05.

Cálculo de dureza latón:

Primer ensayo:

$$HB - latón = \frac{2 * F}{\pi * D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$$HB - latón = \frac{2 * 1000}{\pi * 10(10 - \sqrt{10^2 - 3,79^2})} = 85,33 \frac{kgf}{mm^2}$$

Segundo ensayo:

$$HB - latón = \frac{2 * F}{\pi * D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$$HB - latón = \frac{2 * 1000}{\pi * 10(10 - \sqrt{10^2 - 3,54^2})} = 98,31 \frac{kgf}{mm^2}$$

Se obtiene el valor promedio de dureza Brinell:

$$HB - latón - Promedio = \frac{85,33 + 98,31}{2} = 91,82 \frac{kgf}{mm^2}$$

En el laboratorio virtual se obtuvo un valor de 91,87, en los cálculos realizados un valor de 91,82 obteniendo una diferencia de 0,05.

Cálculo de dureza acero dulce:

Primer ensayo:

$$HB - \text{acero dulce} = \frac{2 * F}{\pi * D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$$HB - \text{acero dulce} = \frac{2 * 3000}{\pi * 10(10 - \sqrt{10^2 - 4,6^2})} = 170,39 \frac{kgf}{mm^2}$$

Segundo ensayo:

$$HB - \text{acero dulce} = \frac{2 * F}{\pi * D(D - \sqrt{D^2 - d^2})}$$

$$HB - \text{acero dulce} = \frac{2 * 3000}{\pi * 10(10 - \sqrt{10^2 - 4,74^2})} = 159,85 \frac{kgf}{mm^2}$$

Se obtiene el valor promedio de dureza Brinell:

$$HB - \text{acero dulce} - \text{Promedio} = \frac{170,39 + 159,85}{2} = 165,12 \frac{kgf}{mm^2}$$

En el laboratorio virtual se obtuvo un valor de 165,22, en los cálculos realizados un valor de 165,12 obteniendo una diferencia de 0,1.

Verificación dureza Vickers:

Aluminio:

Primer ensayo:

Cálculo de la dureza:

$$HRV \text{ aluminio} = \frac{0,1891 * F}{d^2}$$

$$HRV \text{ aluminio} = \frac{0,1891 * 98,1}{(0,362)^2} = 141,56 \frac{N}{mm^2}$$

Segundo ensayo:

Cálculo de la dureza:

$$HRV \text{ aluminio} = \frac{0,1891 * F}{d^2}$$

$$HRV \text{ aluminio} = \frac{0,1891 * 98,1}{(0.3595)^2} = 143,53 \frac{N}{mm^2}$$

Se obtiene el valor promedio de dureza Vickers:

$$HRV - \text{aluminio} - \text{Promedio} = \frac{141,56 + 143,53}{2} = 142,54 \frac{N}{mm^2}$$

En el laboratorio virtual se obtuvo un valor de 142,47, en los cálculos realizados un valor de 142,54 obteniendo una diferencia de 0,07.

Latón:

Primer ensayo

Cálculo de la dureza:

$$HRV \text{ laton} = \frac{0,1891 * F}{d^2}$$

$$HRV \text{ laton} = \frac{0,1891 * 196.2}{(0.47)^2} = 167,95 \frac{N}{mm^2}$$

Segundo ensayo

Cálculo de la dureza:

$$HRV \text{ laton} = \frac{0,1891 * F}{d^2}$$

$$HRV \text{ laton} = \frac{0,1891 * 196.2}{(0.463)^2} = 173,07 \frac{N}{mm^2}$$

Se obtiene el valor promedio de dureza Vickers:

$$HRV - \text{latón} - \text{Promedio} = \frac{167,95 + 173,07}{2} = 170,51 \frac{N}{mm^2}$$

En el laboratorio virtual se obtuvo un valor de 170,42, en los cálculos realizados un valor de 170,51 obteniendo una diferencia de 0,09.

Acero dulce:

Primer ensayo

Cálculo de la dureza:

$$HRV \text{ acero dulce} = \frac{0,1891 * F}{d^2}$$

$$HRV \text{ acero dulce} = \frac{0,1891 * 294.3}{(0.2755)^2} = 733,22 \frac{N}{mm^2}$$

Segundo ensayo

Cálculo de la dureza:

$$HRV \text{ acero dulce} = \frac{0,1891 * F}{d^2}$$

$$HRV \text{ acero dulce} = \frac{0,1891 * 196.2}{(0.2715)^2} = 754,99 \frac{N}{mm^2}$$

Se obtiene el valor promedio de dureza Vickers:

$$HRV - \text{acero dulce} - \text{Promedio} = \frac{733,22 + 754,99}{2} = 744,10 \frac{N}{mm^2}$$

En el laboratorio virtual se obtuvo un valor de 743,68, en los cálculos realizados un valor de 744,10 obteniendo una diferencia de 0,425.

4.2. Datos Obtenidos en Software CAD

En la tabla 42 se exponen los valores de dureza en escala Rockwell, Brinell y Vickers del acero dulce, latón y aluminio respectivamente en el software ansys.

Tabla 42

Valores de Dureza Obtenidos.

Material	Escala de dureza		
	Rockwell (HRB)	Brinell ($\frac{N}{mm^2}$)	Vickers ($\frac{N}{mm^2}$)
Acero dulce	118,21	159,13	735,89

Material	Escala de dureza		
	Rockwell (HRB)	Brinell ($\frac{N}{mm^2}$)	Vickers ($\frac{N}{mm^2}$)
Latón	84,0065	103,68	177,25
Aluminio	74,282	82,55	141,17

Nota. Valores promedio de la dureza del acero dulce, latón y aluminio generados mediante el software ANSYS

4.3. Análisis de resultados

El análisis de enfoca en el análisis de resultados del software CAD, laboratorios virtuales y valores obtenidos mediante fórmulas para obtener porcentajes de error.

4.3.1 Análisis entre laboratorios virtuales y software CAD.

En la tabla 43 se exponen los porcentajes de error de dureza en escala Rockwell, Brinell y Vickers de los materiales ensayados de acero dulce, latón y aluminio, que fueron obtenidos en el software ANSYS y en los laboratorios virtuales.

Tabla 43

Porcentajes de error.

Análisis entre Laboratorios y software CAD			
Material	Valor obtenido ANSYS	Valor obtenido en en Laboratorio virtual	Porcentaje de Error
	Dureza Rockwell (HRB)		
Acero dulce	95,744	89	7,577

Análisis entre Laboratorios y software CAD			
Material	Valor obtenido en ANSYS	Valor obtenido en Laboratorio virtual	Porcentaje de Error
Latón	84,0065	78,5	7,014
Aluminio	74,282	70,5	5,364
Dureza Brinell ($\frac{kgf}{mm^2}$)			
Acero dulce	159,13	165,22	3,827
Latón	97,74	91,87	6,389
Aluminio	82,55	83,34	0,94
Dureza Vickers ($\frac{N}{mm^2}$)			
Acero dulce	735,89	743,68	1,047
Latón	177,25	170,42	4,107
Aluminio	141,17	142,47	0,912

Nota. En la tabla se presentan los porcentajes de error de valores de dureza en escala Rockwell, Brinell y Vickers del aluminio, acero dulce y latón que fueron obtenidos en ANSYS y virtual labs.

En el ensayo de dureza Rockwell, en el laboratorio virtual el acero tiene una dureza de 89 en el ANSYS se tiene una dureza 95,744 con un porcentaje de error de 7,577%. En el laboratorio virtual el latón tiene una dureza de 78,5 en el ANSYS se tiene una dureza 84,0065 con un porcentaje de error de 7,014%. En el laboratorio virtual el aluminio tiene una dureza de 70,5 en el ANSYS se tiene una dureza 74,282 con un porcentaje de error de 5,364%.

En el ensayo de dureza Brinell, en el laboratorio virtual el acero tiene una dureza de 165,22 en el ANSYS se tiene una dureza 159,13 con un porcentaje de error de 3,827%. En el laboratorio virtual el latón tiene una dureza de 91,87 en el ANSYS se tiene una dureza 97,74 con un porcentaje de error de 6,389%. En el laboratorio virtual el aluminio tiene una dureza de 83,34 en el ANSYS se tiene una dureza 82,55 con un porcentaje de error de 0,94%.

En el ensayo de dureza Vickers, en el laboratorio virtual el acero tiene una dureza de 743,68 en el ANSYS se tiene una dureza 735,89 con un porcentaje de error de 1,047%. En el laboratorio virtual el latón tiene una dureza de 170,42 en el ANSYS se tiene una dureza 177,25 con un porcentaje de error de 4,107%. En el laboratorio virtual el aluminio tiene una dureza de 142,47 en el ANSYS se tiene una dureza 141,17 con un porcentaje de error de 0,912%.

El porcentaje de error obtenido en el aluminio, latón y acero dulce, en los ensayos Brinell, Rockwell y Vickers, se encuentra un valor máximo en el porcentaje de error del 7,557 %, en la norma se establece un valor máximo del 10% entre prueba y prueba.

4.3.2. Análisis entre laboratorios virtuales y valores calculados mediante fórmulas.

En el laboratorio virtual se analizó los valores obtenidos en el laboratorio y los calculados mediante fórmulas.

En la tabla 44 se exponen los porcentajes de error de dureza en escala Rockwell, Brinell y Vickers de los materiales ensayados de acero dulce, latón y aluminio, que fueron obtenidos mediante aplicación de fórmulas y en los laboratorios virtuales.

Tabla 44

Análisis de porcentajes de error.

Análisis entre laboratorio y mediante formulas			
Material	Valor obtenido en Laboratorio virtual	Valor obtenido mediante formulas	Porcentaje de Error
Dureza Rockwell (HRB)			
Acero dulce	89	N/A	N/A
Latón	78,5	N/A	N/A
Aluminio	70,5	N/A	N/A
Dureza Brinell ($\frac{kgf}{mm^2}$)			
Acero dulce	165,22	165,12	0,06
Latón	91,87	91,82	0,05
Aluminio	83,34	83,29	0,06
Dureza Vickers ($\frac{N}{mm^2}$)			
Acero dulce	743,68	744,10	0,05
Latón	170,42	170,51	0,05
Aluminio	142,47	142,54	0,04

Nota. En la tabla se presentan el análisis de diferencia de valores de dureza en escala Rockwell, Brinell y Vickers del aluminio, acero dulce y latón que fueron obtenidos en Virtual Labs.

En el ensayo de dureza Brinell, en el laboratorio virtual el acero tiene una dureza de 165,22, el valor obtenido mediante fórmulas es de 165,12 con un porcentaje de error de 0,06 %. En el laboratorio virtual el latón tiene una

dureza de 91,87, el valor obtenido mediante fórmulas es de 91,82 con un porcentaje de error de 0,05%. En el laboratorio virtual el aluminio tiene una dureza de 83,34, el valor obtenido mediante fórmulas es de 83,29 con un porcentaje de error de 0,06%.

En el ensayo de dureza Vickers, en el laboratorio virtual el acero tiene una dureza de 743,68, el valor obtenido mediante fórmulas es de 744,10 con un porcentaje de error de 0,05%. En el laboratorio virtual el latón tiene una dureza de 170,42, el valor obtenido mediante fórmulas es de 170,51 con un porcentaje de error de 0,05%. En el laboratorio virtual el aluminio tiene una dureza de 142,47, el valor obtenido mediante fórmulas es de 142,54 con un porcentaje de error de 0,04%.

En el ensayo Rockwell no se puede obtener porcentaje ya que no se tiene profundidades de indentación para analizar mediante fórmulas.

El porcentaje de error obtenido en el aluminio, latón y acero dulce, en los ensayos Brinell y Vickers es menor al 1% con lo cual se tiene un valor menor al 10% especificado por la norma.

Capítulo V

5. Conclusiones y recomendaciones

5.1 Conclusiones

Se realizaron los ensayos de dureza Brinell, Rockwell y Vickers, en laboratorio virtual (Virtual Labs) y se obtuvieron los siguientes resultados, en el ensayo de dureza Rockwell, el acero tiene una dureza de 89, el latón tiene una dureza de 78,5 y el aluminio tiene una dureza de 70,5, en el ensayo de dureza Brinell, el acero tiene una dureza de 165,22, el latón tiene una dureza de 91,87 y el aluminio tiene una dureza de 83,34, en el ensayo de dureza Vickers, el acero tiene una dureza de 743,68, el latón tiene una dureza de 170.42 y el aluminio tiene una dureza de 142,47.

Se realizaron los ensayos de dureza Brinell, Rockwell y Vickers en el software CAD (ANSYS) y se obtuvieron los siguientes resultados, en el ensayo de dureza Rockwell, el acero tiene una dureza de 95,744, el latón tiene una dureza de 84,0065 y el aluminio tiene una dureza de 74,282, en el ensayo de dureza Brinell, el acero tiene una dureza de 159,13, el latón tiene una dureza de 97,74 y el aluminio tiene una dureza de 82,55, en el ensayo de dureza Vickers, el acero tiene una dureza de 735,89, el latón tiene una dureza de 177,25 y el aluminio tiene una dureza de 141,17.

El porcentaje de error máximo obtenido es de 7,577% del laboratorio virtual respecto al software de simulación CAD (ANSYS), con lo cual no sobrepasa el 10% máximo establecido por la norma, por lo tanto, el laboratorio virtual (Virtual Labs), se puede utilizar estos ensayos.

5.2 Recomendaciones

Se recomienda a la página Virtual Labs que al momento de realizar el algoritmo de cálculo de valores de dureza en el ensayo Rockwell, Brinell y Vickers se tome en cuenta el uso de los decimales ya que existe una diferencia entre valores presentados en la página y los calculados.

Es recomendable que la pagina Virtual Labs específicamente en el ensayo de dureza Rockwell presente valores de profundidad de indentación ya que solo presenta valores de dureza de manera directa sin previa obtención de estos valores, ya que no permite realizar un análisis mediante fórmulas.

Se recomienda a los diseñadores del software ANSYS que amplie la gama de materiales en su biblioteca para realizar análisis, ya que cuenta con un stock limitado a comparación de otros programas de análisis por elementos finitos.

Es recomendable que la pagina Virtual Labs especifique el tipo de material está empleando en cada ensayo, ya que existe una variedad de acero dulces, aluminios y latones, con lo cual no se está delimitando este parámetro, ya que, al momento de generar una simulación, la alternativa encontrada fue buscar valores próximos de dureza de materiales a los obtenidos en el laboratorio virtual (Virtual Labs) y con estos obtener propiedades mecánicas para crear materiales nuevos en el software CAD (ANSYS).

Bibliografía

- ABAX. (4 de Septiembre de 2020). *abax3dtech*. Obtenido de <https://abax3dtech.com/2020/09/04/introduccion-a-solidworks/>
- AISEK. (2019). *Autodesk Inventor: el software profesional de CAD 3D para diseño de productos e ingeniería*. Obtenido de <https://www.deustoformacion.com/blog/disenio-arquitectonico/que-es-para-que-sirve-autodesk-inventor-diseno-producto/>).
- Aleman, S. (11 de abril de 2018). *Ensayos de Dureza en los Materiales*. Obtenido de https://www.academia.edu/42643479/Ensayo_de_dureza_Brinell_ASTM_E10
- Algetec. (2016). *LABORATORIOS VIRTUALES*. Obtenido de [https://www-algetec-com-br.translate.goog/br/laboratoriosvirtuais?_x_tr_sl=pt&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=nui,sc](https://www.algetec-com-br.translate.goog/br/laboratoriosvirtuais?_x_tr_sl=pt&_x_tr_tl=es&_x_tr_hl=es&_x_tr_pto=nui,sc)
- American Society for Testing and Materials. (2017). *Standard Test Method for Vickers Hardness Testing of Metallic Materials (ASTM E92_17)*. <https://www.koopaco.com/standards/ASTM-E92-17-3-01-standard-test-vickers-knoop-hardness.pdf>
- American Society for Testing and Materials. (2015). *Standard Test Method for Rockwell Hardness Testing of Metallic Materials (ASTM E18_15)*. https://repositorio.uisek.edu.ec/bitstream/123456789/2680/3/ASTM_E18-15.pdf
- American Society for Testing and Materials. (2015). *Standard Test Method for Brinell Hardness Testing of Metallic Materials (ASTM E10_15)*. <https://vostok-7.ru/upload/iblock/baa/baa379b91cdedceebfdb9e2f575315b.pdf>
- ASTM International. (2015). *Escalas de dureza brinell*. [Tabla 1]. Recuperado

de: Standard Test Method for Brinell Hardness Testing of Metallic Materials [f](#)
ASTM International. (2015). *Tiempo en ensayo Brinell* . [Tabla 2]. Recuperado
de: Standard Test Method for Brinell Hardness Testing of Metallic Materials
ASTM International. (2015). *Espesor de la pieza de prueba en función de 10
veces la indentación*. [Tabla 4]. Recuperado de: Standard Test Method for
Brinell Hardness Testing of Metallic Materials
ASTM International. (2015). *Diámetro de indentadores*. [Tabla 4]. Recuperado
de: Standard Test Method for Brinell Hardness Testing of Metallic Materials
ASTM International. (2015). *Diámetro de indentadores*. [Tabla 6]. Recuperado
de: Standard Test Method for Rockwell Hardness Testing of Metallic Materials
ASTM International. (2015). *Indentadores dependiendo del material a ensayar*.
[Tabla 7]. Recuperado de: Standard Test Method for Rockwell Hardness
Testing of Metallic Materials
ASTM International. (2015). *Tiempos de tolerancia de los ciclos*. [Tabla 8].
Recuperado de: Standard Test Method for Rockwell Hardness Testing of
Metallic Materials
ASTM International. (2015). *Fuerza Aplicada dependiendo del indentador y la
escala*. [Tabla 9]. Recuperado de: Standard Test Method for Rockwell
Hardness Testing of Metallic Materials
ASTM International. (2015). *Grosor mínimo de las piezas de prueba usando
penetrado de bola de 1/16 in*. [Tabla 11]. Recuperado de: *Standard Test
Method for Rockwell Hardness Testing of Metallic Materials*
ASTM International. (2015). *Grosor mínimo de las piezas de prueba usando
penetrador de diamante*. [Tabla 12]. Recuperado de: *Standard Test Method for
Rockwell Hardness Testing of Metallic Materials*
ASTM International. (2017). *Indentador Vickers*. [Tabla 13]. Recuperado de:

- Standard Test Method for Vickers Hardness Testing of Metallic Materials
ASTM International. (2017). *Escalas de dureza estándar y fuerza de prueba*.
[Tabla 15]. Recuperado de: Standard Test Method for Vickers Hardness
Testing of Metallic Materials
- Calle, G., & Henao, E. (2012). *DUREZA ROCKWELL* . Obtenido de
<http://gomez2010.weebly.com/uploads/5/8/0/2/5802271/durezarockwell.pdf>
- Calvo, I., López, J. M., Gangoiti, U., & Zulueta, E. (2005). *Laboratorios
remotos y virtuales en enseñanzas técnicas y científicas*. Cuba: Universidad
de Oriente.
- Cristel, C., & Arlyn, G. (2016). *Ensayo de tensión por medio de software de
Simulación*. Panama: Universidad Tecnológica de Panamá.
- Educacion, C. T. (2017). *Laboratorio virtual de mecanica de la ingenieria* .
Obtenido de [https://www.cienytec.com/edu2-simulador-laboratorio-virtual-
mecanica-de-la-ingenieria-pnx.htm](https://www.cienytec.com/edu2-simulador-laboratorio-virtual-mecanica-de-la-ingenieria-pnx.htm)
- experts, I. I. (2021). *integralplm*. Obtenido de <https://integralplm.com/ansys/>
- Ingenmecanica. (2013). *Ensayos de Dureza en los Materiales*. Obtenido de
<https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn218.html>
- Labs, V. (s.f.). *Acerca de VLAB*. Obtenido de <https://www.vlab.co.in/about-us>
- Metalinspec. (6 de Abril de 2021). *¿Para que sirve una prueba de dureza?*
Obtenido de [https://www.blog.metalinspec.com.mx/post/para-que-sirve-una-
prueba-de-dureza](https://www.blog.metalinspec.com.mx/post/para-que-sirve-una-prueba-de-dureza)
- Neurtek. (2014). *Espesores mínimos para el ensayo de dureza Vickers*. [Tabla
14]. Recuperado de: [https://www.neurtek.com/es/academia/articulos-
tecnicos/metalografia-preparacion-de-muestras/control-de-la-dureza-de-
metales-generalidades](https://www.neurtek.com/es/academia/articulos-tecnicos/metalografia-preparacion-de-muestras/control-de-la-dureza-de-metales-generalidades)
- Perdomo, S. (08 de Julio de 2020). *Deustoformacion*. Obtenido de

<https://www.deustoformacion.com/blog/disenio-arquitectonico/que-es-para-que-sirve-autodesk-inventor-disenio-producto>

Praxilabs. (8 de Febrero de 2018). *Características y beneficios de Virtual Labs*.

Obtenido de <https://blog.praxilabs.com/2018/02/08/virtual-labs-features-benefits/>

R, J. L. (s.f.). *Como funciona*. Obtenido de <https://como-funciona.co/undurometro/>

Salazar, M. F. (2020). *Diseño de un laboratorio virtual de ensayos destructivos y metalografía mediante el software sketchup y shapspark para prácticas en las asignaturas de ciencias de materiales*. Quito: UNIVERSIDAD INTERNACIONAL SEK.

SIEMENS. (2021). *Diseño asistido por ordenador (CAD)*. Obtenido de

<https://www.plm.automation.siemens.com/global/es/our-story/glossary/computer-aided-design-cad/12507>

Velasco, A., Arellano, J., Martínez, V., & Velasco, S. (Mayo de 2013).

Laboratorios virtuales: alternativa en la educación. Obtenido de

<https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol26num2/articulos/laboratorios.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Brinell*. [Tabla 5]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Rockwell*. [Tabla 10]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Vickers*. [Tabla 16]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Rockwell*. [Tabla 17]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Rockwell*. [Tabla 18]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Rockwell*. [Tabla 19]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Rockwell*. [Tabla 20]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Rockwell*. [Tabla 21]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Rockwell*. [Tabla 22]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Brinell*. [Tabla 23]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Brinell*. [Tabla 24]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Brinell*. [Tabla 25]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Brinell*. [Tabla 26]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Brinell*. [Tabla 27]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Brinell*. [Tabla 28]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Brinell*. [Tabla 29]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Vickers*. [Tabla 30]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Vickers*. [Tabla 31]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Vickers*. [Tabla 32]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Vickers*. [Tabla 32]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Vickers*. [Tabla 33]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Vickers*. [Tabla 34]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Vickers*. [Tabla 35]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Vickers*. [Tabla 36]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>

Virtual Labs. (2016). *Prueba de dureza Vickers*. [Tabla 37]. Recuperado de:

<https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp/brinell-hardness-test/simulation.html>