



**Estudio del acero dulce y hierro fundido sometidos a tracción y compresión  
utilizando laboratorios virtuales y software CAD bajo normas internacionales**

Guayllas Guamán, Pablo Felipe

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 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 DEL ACERO DULCE Y HIERRO FUNDIDO SOMETIDOS A TRACCIÓN Y COMPRESIÓN UTILIZANDO LABORATORIOS VIRTUALES Y SOFTWARE CAD BAJO NORMAS INTERNACIONALES**” fue realizado por el señor **Guayllas Guamán, Pablo Felipe** 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 sustentepúblicamente.

Latacunga, 04 de febrero del 2022



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

Ing. Carvajal Naranjo, Miguel Alberto, Mgs.

C.C.: 1801711936



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

REPORTE DE VERIFICACIÓN DE CONTENIDO



Guayllas Pablo\_Proyecto Titulación Final.docx  
Scanned on: 19:13 January 31, 2022 UTC



Identical Words	37
Words with Minor Changes	0
Paraphrased Words	43
Ommited Words	2109



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

Ing. Carvajal Naranjo, Miguel Alberto, Mgs.

C.C.: 1801711936



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

**AUTORÍA DE RESPONSABILIDAD**

Yo, **Guayllas Guamán, Pablo Felipe** con cedula de ciudadanía N°**0105869275**, declaramos que el contenido, ideas y criterios del trabajo de Unidad de Integración Curricular: **“ESTUDIO DEL ACERO DULCE Y HIERRO FUNDIDO SOMETIDOS A TRACCIÓN Y COMPRESIÓN 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



---

Guayllas Guamán, Pablo Felipe

C.C.: 0105869275



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

**AUTORIZACIÓN DE PUBLICACIÓN**

Yo, **Guayllas Guamán, Pablo Felipe** con cedula de ciudadanía N° **0105869275**, autorizo a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE publicar el trabajo de Unidad de Integración Curricular: **“ESTUDIO DEL ACERO DULCE Y HIERRO FUNDIDO SOMETIDOS A TRACCIÓN Y COMPRESIÓN 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

---

Guayllas Guamán, Pablo Felipe

C.C.: 0105869275

## **Dedicatoria**

Brindo el esfuerzo, dedicación y perseverancia puesta de mi parte a toda mi familia, quienes me apoyaron y motivaron desde el inicio de este camino, en especial a mis padres quienes fueron mi mayor soporte para luchar contra las actuales adversidades y me dieron consejo para no rendirme jamás.

De igual manera le dedico esta meta a quien me supo apoyar incondicionalmente en el transcurso de los últimos años.

**GUAYLLAS GUAMÁN, PABLO FELIPE**

## Agradecimiento

Agradezco en primer lugar a mi Manuel, mi padre, quien ha sido la piedra angular de mi camino, gracias a su amor, apoyo y consejo he logrado alcanzar tan  
anhelada meta.

A Digna, mi madre, quien con su amor y su cuidado me ha dado el ánimo y  
aliento que he necesitado.

A mis hermanos, que siempre estuvieron dispuestos a darme una mano en lo  
que hiciera falta, por la motivación y el ejemplo que me han dado.

A mi familia en general, muchas gracias.

A Ale quien se convirtió en un pilar de mi vida, quien con su cariño y aliento  
ha motivado mi superación personal.

A Mathew quien ha sido un compañero y amigo incondicional a lo largo de la  
carrera.

Agradezco a los ingenieros de la ESPE que supieron guiarme por este  
camino y creyeron en mi persona para alcanzar esta meta.

Al Ing. Miguel Carvajal por guiarme en el desarrollo del presente trabajo de  
investigación.

## Tabla de contenido

Carátula.....	1
Certificación.....	1
Reporte de verificación de contenido .....	2
Autoría de responsabilidad.....	4
Autorización de publicación .....	5
Dedicatoria.....	6
Agradecimiento .....	7
Tabla de contenido .....	8
Índice de Tablas .....	11
Índice de Figuras .....	13
Resumen .....	16
Abstract.....	17
Generalidades.....	18
Antecedentes .....	18
Planteamiento del problema .....	20
Justificación e Importancia .....	20
Objetivos .....	21
<i>Objetivo General</i> .....	21
<i>Objetivos específicos</i> .....	21
Hipótesis .....	21
Variables de investigación .....	21
<i>Variables independientes</i> .....	21
<i>Variables dependientes</i> .....	21
Marco teórico .....	22
Laboratorios virtuales .....	22
Software CAD.....	24
Propiedades Mecánicas .....	27
Clasificación de ensayos de materiales .....	28
Máquina de ensayos universal .....	29
Ensayo de tracción o tensión .....	31

<i>Propiedades mecánicas</i> .....	33
Ensayo de compresión.....	40
<i>Gráfica, resultados y fórmulas a obtener del ensayo de compresión.</i> .....	41
Metodología .....	45
Proceso del ensayo de tensión.....	45
<i>Acero Dulce</i> .....	45
<i>Hierro fundido</i> .....	55
Procedimiento para el ensayo de compresión .....	66
<i>Acero dulce</i> .....	66
<i>Hierro Fundido</i> .....	75
Software CAD.....	83
<i>Ensayo de tensión de acero dulce</i> .....	83
<i>Ensayo de tensión del hierro fundido</i> .....	88
<i>Ensayo de compresión del acero dulce</i> .....	92
<i>Ensayo de compresión del hierro fundido</i> .....	96
Análisis de resultados .....	100
<i>Ensayo de tensión acero dulce</i> .....	100
<i>Ensayo de tensión hierro fundido</i> .....	101
<i>Ensayo de compresión acero dulce</i> .....	103
<i>Ensayo de compresión hierro fundido</i> .....	104
Conclusiones.....	107

<b>Recomendaciones.....</b>	<b>109</b>
<b>Bibliografía.....</b>	<b>110</b>
<b>Anexos .....</b>	<b>113</b>

## Índice de Tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Propiedades mecánicas y físicas de los materiales.....</i>	<b>29</b>
<b>Tabla 2</b> <i>Valores iniciales y finales de la probeta de acero dulce utilizada.....</i>	<b>52</b>
<b>Tabla 3</b> <i>Valores aplicados por el simulador a la probeta .....</i>	<b>52</b>
<b>Tabla 4</b> <i>Valores de esfuerzo, deformación y el área bajo la curva a lo largo del ensayo realizado.....</i>	<b>53</b>
<b>Tabla 5</b> <i>Resultado de las diferentes propiedades mecánicas calculadas mediante el software excel .....</i>	<b>54</b>
<b>Tabla 6</b> <i>Valores iniciales y finales de la probeta de acero dulce utilizada.....</i>	<b>62</b>
<b>Tabla 7</b> <i>Valores aplicados por el simulador a la probeta .....</i>	<b>62</b>
<b>Tabla 8</b> <i>Valores de esfuerzo, deformación y el área bajo la curva a lo largo del ensayo realizado.....</i>	<b>63</b>
<b>Tabla 9</b> <i>Resultado de las diferentes propiedades mecánicas calculadas mediante el software excel .....</i>	<b>64</b>
<b>Tabla 10</b> <i>Tabla de carga aplicada .....</i>	<b>68</b>
<b>Tabla 11</b> <i>Valores iniciales y finales de la probeta de acero dulce utilizada.....</i>	<b>71</b>
<b>Tabla 12</b> <i>Valores de esfuerzo, deformación y el área bajo la curva a lo largo del ensayo realizado.....</i>	<b>71</b>
<b>Tabla 13</b> <i>Resultado de las diferentes propiedades mecánicas calculadas mediante el software excel .....</i>	<b>72</b>
<b>Tabla 14</b> <i>Tabla de carga aplicada .....</i>	<b>78</b>
<b>Tabla 15</b> <i>Valores iniciales y finales de la probeta de acero dulce utilizada.....</i>	<b>80</b>
<b>Tabla 16</b> <i>Valores de esfuerzo, deformación y el área bajo la curva a lo largo del ensayo realizado.....</i>	<b>81</b>
<b>Tabla 17</b> <i>Resultado de las diferentes propiedades mecánicas calculadas mediante el software excel .....</i>	<b>82</b>
<b>Tabla 18</b> <i>Dimensiones y fuerza requerida para la simulación en software CAD.....</i>	<b>83</b>
<b>Tabla 19</b> <i>Valores para la generación de la curva esfuerzo deformación.....</i>	<b>86</b>
<b>Tabla 20</b> <i>Dimensiones y fuerza requerida para la simulación en software CAD.....</i>	<b>88</b>
<b>Tabla 21</b> <i>Valores para la generación de la curva esfuerzo deformación.....</i>	<b>91</b>
<b>Tabla 22</b> <i>Dimensiones para la simulación en software CAD .....</i>	<b>92</b>
<b>Tabla 23</b> <i>Valores para la generación de la curva esfuerzo deformación.....</i>	<b>95</b>
<b>Tabla 24</b> <i>Dimensiones y fuerza requerida para la simulación en software CAD.....</i>	<b>96</b>
<b>Tabla 25</b> <i>Valores para la generación de la curva esfuerzo deformación.....</i>	<b>99</b>
<b>Tabla 26</b> <i>Tabla de resultados de los diferentes softwares y valores estandarizadas del material .....</i>	<b>100</b>

<b>Tabla 27</b>	<i>Tabla de porcentajes de error en comparación a los resultados del software Ansys. ....</i>	<b>101</b>
<b>Tabla 28</b>	<i>Tabla de resultados de los diferentes softwares y valores estandarizados del material .....</i>	<b>102</b>
<b>Tabla 29</b>	<i>Tabla de porcentajes de error en comparación a los resultados del VirtualLabs.....</i>	<b>102</b>
<b>Tabla 30</b>	<i>Tabla de resultados de los diferentes softwares y valores estandarizadas del material .....</i>	<b>103</b>
<b>Tabla 31</b>	<i>Tabla de porcentajes de error en comparación a los resultados del VirtualLabs.....</i>	<b>104</b>
<b>Tabla 32</b>	<i>Tabla de resultados de los diferentes softwares y valores estandarizadas del material .....</i>	<b>105</b>
<b>Tabla 33</b>	<i>Tabla de porcentajes de error en comparación a los resultados del VirtualLabs.....</i>	<b>105</b>

## Índice de Figuras

<b>Figura 1</b> <i>Plataforma ELECTUDE.</i> .....	<b>22</b>
<b>Figura 2</b> <i>Interfaz del laboratorio Mozaik</i> .....	<b>23</b>
<b>Figura 3</b> <i>Interfaz del laboratorio virtual MVlab</i> .....	<b>23</b>
<b>Figura 4</b> <i>Interfaz del laboratorio Virtual Labs</i> .....	<b>24</b>
<b>Figura 5</b> <i>Software AutoCAD</i> .....	<b>25</b>
<b>Figura 6</b> <i>Interfaz software CATIA</i> .....	<b>26</b>
<b>Figura 7</b> <i>Interfaz software FreeCAD</i> .....	<b>26</b>
<b>Figura 8</b> <i>Ansys Student</i> .....	<b>27</b>
<b>Figura 9</b> <i>Máquina de ensayos universal hidráulica</i> .....	<b>29</b>
<b>Figura 10</b> <i>Máquina de ensayos universal electromecánica</i> .....	<b>30</b>
<b>Figura 11</b> <i>Probeta correspondiente al ensayo de tensión</i> .....	<b>32</b>
<b>Figura 12</b> <i>Probeta correspondiente al ensayo de tensión para hierro fundido</i> .....	<b>32</b>
<b>Figura 13</b> <i>Probeta correspondiente al ensayo de tensión para acero dulce</i> .....	<b>33</b>
<b>Figura 14</b> <i>Gráfica esfuerzo – deformación del ensayo en acero dulce</i> .....	<b>33</b>
<b>Figura 15</b> <i>Gráfica del esfuerzo de cedencia B-B'</i> .....	<b>36</b>
<b>Figura 16</b> <i>Uso del software Excel en ensayos.</i> .....	<b>38</b>
<b>Figura 17</b> <i>Fracturas de probetas dúctiles</i> .....	<b>39</b>
<b>Figura 18</b> <i>Fractura de materiales frágiles</i> .....	<b>40</b>
<b>Figura 19</b> <i>Dimensiones estándar para probetas sujetas a compresión</i> .....	<b>40</b>
<b>Figura 20</b> <i>Dimensiones estándar para probetas sujetas a compresión</i> .....	<b>41</b>
<b>Figura 21</b> <i>Gráfica de esfuerzo – deformación en el acero dulce y hierro fundido</i> ....	<b>42</b>
<b>Figura 22</b> <i>Patrones de falla en un material dúctil en función de L/D</i> .....	<b>43</b>
<b>Figura 23</b> <i>Puntos de referencia de la probeta</i> .....	<b>45</b>
<b>Figura 24</b> <i>Medidas utilizadas en el laboratorio virtual bajo la norma IS 1608</i> .....	<b>45</b>
<b>Figura 25</b> <i>Medidas utilizadas en el laboratorio virtual bajo la norma IS 1608</i> .....	<b>46</b>
<b>Figura 26</b> <i>Puntos de referencia a realizar en la probeta</i> .....	<b>46</b>
<b>Figura 27</b> <i>Ajuste de la probeta en la máquina en conjunto con el extensómetro</i> .....	<b>47</b>
<b>Figura 28</b> <i>Verificación del extensómetro</i> .....	<b>48</b>
<b>Figura 29</b> <i>Ajuste de la carga o tensión requerida y aplicación de esta a la probeta</i> .....	<b>48</b>
<b>Figura 30</b> <i>Pantalla de datos obtenidos en la simulación realizada</i> .....	<b>49</b>
<b>Figura 31</b> <i>Gráfica obtenida en función de los datos de fuerza y deformación</i> .....	<b>49</b>
<b>Figura 32</b> <i>Gráfica obtenida en función de los datos de los extensómetros</i> .....	<b>50</b>
<b>Figura 33</b> <i>Medición de (W) en el punto más cercano a la rotura de la probeta</i> .....	<b>51</b>
<b>Figura 34</b> <i>Medición de G de la probeta.</i> .....	<b>51</b>

<b>Figura 35</b> <i>Valores obtenidos en el laboratorio virtual</i> .....	<b>51</b>
<b>Figura 36</b> <i>Gráfica obtenida en el software excel</i> .....	<b>55</b>
<b>Figura 37</b> <i>Medición del diámetro de la probeta y cálculo del área inicial</i> .....	<b>56</b>
<b>Figura 38</b> <i>Medida de la longitud de la probeta</i> .....	<b>56</b>
<b>Figura 39</b> <i>Puntos de referencia a realizar en la probeta</i> .....	<b>57</b>
<b>Figura 40</b> <i>Ajuste de la probeta en la máquina</i> .....	<b>57</b>
<b>Figura 41</b> <i>Encerado del comparador de carátula</i> .....	<b>58</b>
<b>Figura 42</b> <i>Inicio del ensayo de tracción</i> .....	<b>58</b>
<b>Figura 43</b> <i>Pantalla de datos obtenidos en la simulación realizada</i> .....	<b>59</b>
<b>Figura 44</b> <i>Gráfica obtenida en función de los datos de fuerza y deformación</i> .....	<b>59</b>
<b>Figura 45</b> <i>Pendiente de la gráfica en función de los datos obtenidos del laboratorio virtual</i> .....	<b>60</b>
<b>Figura 46</b> <i>Resultados de las propiedades mecánicas dadas en el laboratorio virtual</i> .....	<b>60</b>
<b>Figura 47</b> <i>Medición de (W) en el punto más cercano a la rotura de la probeta</i> .....	<b>61</b>
<b>Figura 48</b> <i>Medición de G de la probeta</i> .....	<b>61</b>
<b>Figura 49</b> <i>Gráfica obtenida en el software excel</i> .....	<b>64</b>
<b>Figura 50</b> <i>Gráfica de carga vs alargamiento obtenida en el software excel</i> .....	<b>65</b>
<b>Figura 51</b> <i>Medición del diámetro y cálculo del momento de inercia</i> .....	<b>66</b>
<b>Figura 52</b> <i>Medición de la longitud de la probeta</i> .....	<b>66</b>
<b>Figura 53</b> <i>Colocación de la probeta en la máquina de ensayos</i> .....	<b>67</b>
<b>Figura 54</b> <i>Ajuste y aplicación de la fuerza a la probeta de estudio</i> .....	<b>67</b>
<b>Figura 55</b> <i>Obtención de datos dados por la máquina</i> .....	<b>68</b>
<b>Figura 56</b> <i>Carga vs lectura del comprobador de carátula</i> .....	<b>69</b>
<b>Figura 57</b> <i>Pendiente de la curva</i> .....	<b>70</b>
<b>Figura 58</b> <i>Resultados dados por el laboratorio virtual</i> .....	<b>70</b>
<b>Figura 59</b> <i>Gráfica obtenida en el software excel</i> .....	<b>73</b>
<b>Figura 60</b> <i>Gráfica de carga vs alargamiento obtenida en el software excel</i> .....	<b>73</b>
<b>Figura 61</b> <i>Medición del diámetro y cálculo del momento de inercia</i> .....	<b>75</b>
<b>Figura 62</b> <i>Medición de la longitud de la probeta</i> .....	<b>75</b>
<b>Figura 63</b> <i>Colocación de la probeta en la máquina de ensayos</i> .....	<b>76</b>
<b>Figura 64</b> <i>Ajuste y aplicación de la fuerza a la probeta de estudio</i> .....	<b>76</b>
<b>Figura 65</b> <i>Obtención de datos dados por la máquina</i> .....	<b>77</b>
<b>Figura 66</b> <i>Carga vs lectura del comprobador de carátula</i> .....	<b>79</b>
<b>Figura 67</b> <i>Pendiente de la curva</i> .....	<b>79</b>
<b>Figura 68</b> <i>Resultados dados por el laboratorio virtual</i> .....	<b>80</b>
<b>Figura 69</b> <i>Gráfica obtenida en el software excel</i> .....	<b>83</b>

<b>Figura 70</b> <i>Gráfica de carga vs alargamiento obtenida en el software excel.....</i>	<b>83</b>
<b>Figura 71</b> <i>Características usadas del acero dulce A36 .....</i>	<b>84</b>
<b>Figura 72</b> <i>Mallado de la probeta .....</i>	<b>84</b>
<b>Figura 73</b> <i>Restricción y desplazamiento .....</i>	<b>85</b>
<b>Figura 74</b> <i>Esfuerzo equivalente .....</i>	<b>85</b>
<b>Figura 75</b> <i>Deformación plástica equivalente .....</i>	<b>85</b>
<b>Figura 76</b> <i>Curva esfuerzo deformación obtenida .....</i>	<b>86</b>
<b>Figura 77</b> <i>Propiedades del acero A36.....</i>	<b>87</b>
<b>Figura 78</b> <i>Características usadas del hierro fundido gris .....</i>	<b>88</b>
<b>Figura 79</b> <i>Mallado de la probeta .....</i>	<b>89</b>
<b>Figura 80</b> <i>Restricción y desplazamiento .....</i>	<b>89</b>
<b>Figura 81</b> <i>Esfuerzo equivalente .....</i>	<b>90</b>
<b>Figura 82</b> <i>Deformación plástica equivalente .....</i>	<b>90</b>
<b>Figura 83</b> <i>Curva esfuerzo deformación obtenido .....</i>	<b>90</b>
<b>Figura 84</b> <i>Propiedades del Hierro fundido Gris .....</i>	<b>91</b>
<b>Figura 85</b> <i>Características usadas del acero dulce A36 .....</i>	<b>92</b>
<b>Figura 86</b> <i>Mallado de la probeta .....</i>	<b>93</b>
<b>Figura 87</b> <i>Restricción y desplazamiento .....</i>	<b>93</b>
<b>Figura 88</b> <i>Esfuerzo equivalente .....</i>	<b>94</b>
<b>Figura 89</b> <i>Deformación plástica equivalente .....</i>	<b>94</b>
<b>Figura 90</b> <i>Curva esfuerzo deformación obtenido .....</i>	<b>94</b>
<b>Figura 91</b> <i>Propiedades estandarizadas del acero dulce A36 .....</i>	<b>95</b>
<b>Figura 92</b> <i>Características usadas del hierro fundido gris .....</i>	<b>96</b>
<b>Figura 93</b> <i>Mallado de la probeta .....</i>	<b>97</b>
<b>Figura 94</b> <i>Restricción y desplazamiento .....</i>	<b>97</b>
<b>Figura 95</b> <i>Esfuerzo equivalente .....</i>	<b>98</b>
<b>Figura 96</b> <i>Deformación plástica equivalente .....</i>	<b>98</b>
<b>Figura 97</b> <i>Curva esfuerzo deformación obtenido .....</i>	<b>98</b>
<b>Figura 98</b> <i>Propiedades estandarizadas del Hierro fundido Gris .....</i>	<b>99</b>

## Resumen

El presente trabajo de investigación se enfocará a la obtención de las propiedades mecánicas que son el módulo elástico, punto de fluencia y esfuerzo máximo a la tracción o compresión de los materiales acero dulce (ASTM A36) y hierro gris fundido (Gray Cast Iron) según corresponda, esto se logrará sometiendo a probetas cilíndricas a cargas de tensión y compresión, mediante el uso del laboratorio virtual “VirtualLabs” teniendo como base la norma IS 1608. El uso del laboratorio será comparado para verificar la exactitud de sus resultados mediante cálculos teóricos en el software excel y, mediante simulaciones dinámicas explícitas en el software Ansys Student. Los valores que el laboratorio da como resultado serán usados como parámetros iniciales, tanto para el cálculo teórico de las propiedades mecánicas, como, para la simulación en el software Ansys Student, de igual manera se usarán las tablas de carga – alargamiento y carga – acortamiento para la validación de los resultados que da el VirtualLabs. Sin embargo, al usar el software Ansys se evidencia un margen de error en las simulaciones realizadas a las probetas sometidas a diferentes cargas de tensión y compresión. Llegando a conclusiones acerca de la posible relación que tienen los resultados y el porqué de sus diferencias.

### Palabras clave:

- **ENSAYO DE MATERIALES**
- **NORMA IS1608**
- **ACERO DULCE ASTM A36**
- **HIERRO FUNDIDO GRIS**

### **Abstract**

This research work will focus on obtaining the mechanical properties such as elastic modulus, yield point and maximum tensile or compressive stress of mild steel (ASTM A36) and gray cast iron (Gray Cast Iron) materials as appropriate, this will be achieved by subjecting cylindrical specimens to tension and compression loads, using the virtual laboratory "VirtualLabs", this last one is based on the IS 1608 standard. The use of the laboratory will be compared to verify the accuracy of its results by means of theoretical calculations in excel software and, by means of explicit dynamic simulations in Ansys Student software. The values that the laboratory gives as a result will be used as initial parameters, both for the theoretical calculation of the mechanical properties, and for the simulation in the Ansys Student software, in the same way, the load - elongation and load - shortening tables will be used for the validation of the results given by VirtualLabs. However, when the Ansys software simulation give the stress-strain curve, a margin of error is evident in the simulations performed on the specimens subjected to different tension and compression loads. Conclusions are drawn about the possible relationship between the results and the reason for their differences.

#### **Key words:**

- **MATERIALS TESTING**
- **STANDARD IS1608**
- **MILD STEEL ASTM A36**
- **GRAY CAST IRON**

## Capítulo I

### 1. Generalidades

#### 1.1 Antecedentes

Dada la situación actual por la cual atraviesa la humanidad, se hacen necesarias alternativas al desarrollo físico de los estudios o ensayos que se requieran hacer en materiales para conocer sus propiedades, y a su vez gracias al avance de la tecnología se facilita el proceso enseñanza – aprendizaje de manera virtual, la importancia de los laboratorios en una carrera ingenieril se ve resaltada en el estudio de (Lyle & Rosa, 2005) en el cual se establece que los ingenieros utilizan los laboratorios por dos razones principales: como primera razón está la necesidad de datos que sirvan de guía para el diseño y desarrollo de productos, y la segunda razón es que se requiere determinar si un diseño funciona según lo previsto. En base a esto se opta por la creación de laboratorios virtuales los cuales podemos encontrar en la red, entre estos los mejores estarán disponibles mediante un pago previo.

Un laboratorio virtual es aquel que no existe físicamente y se desarrolla en un medio computacional y simula una amplia variedad de situaciones de una manera interactiva las cuales serán compatibles con la realidad, esto se logra por medio del uso de modelos matemáticos y algoritmos que ayudarán a obtener un resultado según lo da a conocer (Pérez, Pimentel, Martínez, & Pérez, 2013)

De esta manera se crea la posibilidad de estudio ingenieril de manera más interactiva e instructiva, debido a que los estudios experimentales que se realizan previo al diseño y construcción de elementos mecánicos son fundamentales para todas las ramas de la ingeniería, especialmente para las que tratan con estructuras y máquinas

tal como lo dice (Espinoza, 1982).

Estudios relevantes:

- (Álvarez, 2005) en su trabajo titulado “Sistema de laboratorios virtuales para la disciplina Resistencia de Materiales” explica el avance de las NTIC (nuevas tecnologías de la información y comunicación) aplicadas a la educación, el análisis teórico sobre los aspectos fundamentales para la realización de un laboratorio virtual, y la presentación del laboratorio elaborado correspondiente.
- (Lyle & Rosa, 2005) en su trabajo titulado “The Role of the Laboratory in undergraduate Engineering Education” da a conocer la importancia del uso de los laboratorios en el estudio de las ingenierías.
- (Barba, y otros, 2019) en su trabajo titulado “Incorporación de herramientas virtuales para la Enseñanza de Técnicas de Caracterización de Materiales. Experiencias y Propuestas” presenta experiencias y resultados con el empleo de herramientas virtuales disponibles en la red enfocadas hacia la enseñanza de técnicas de caracterización de dureza e impacto.

Como motivo de impulso para el desarrollo de los laboratorios virtuales, se tiene el hecho de que no están permitidas las prácticas presenciales, con el fin de prevenir posibles contagios entre los miembros de la universidad. La principal consecuencia del hecho de no poder tener prácticas presenciales se verá reflejada en el momento que el estudiante deba llevar a cabo los pasos correspondientes a un proceso técnico, perjudicando tanto al

estudiante que omite estos procesos prácticos como a la empresa o negocio en el cual el estudiante desarrolle sus actividades en un futuro, dejando de esta manera una gran brecha de conocimiento previo para su desenvolvimiento profesional.

Parte de la solución a este inconveniente sería el cambio de perspectiva de los estudiantes y docentes, la cual deberá pasar de un miedo a salir hacia un trabajo responsable bajo protocolos y normas de convivencia que se pueden y deben tener en un laboratorio presencial, esto ayudará a la reapertura de los centros de prácticas, laboratorios y demás herramientas para garantizar el aprendizaje de los alumnos y mantener el prestigio de la Universidad.

## **1.2 Planteamiento del problema**

¿Es factible determinar las propiedades mecánicas de los materiales acero dulce y hierro fundido sometidos a tracción y compresión bajo normas utilizando laboratorios virtuales y software CAD?

## **1.3 Justificación e Importancia**

Ante la situación actual de pandemia y falta protocolos de bioseguridad se deberá explorar opciones a los laboratorios físicos, además, la falta de recursos monetarios para la adquisición de nuevas máquinas o ajustes bajo normas de las máquinas antiguas, se dificulta el aprendizaje de los estudiantes que no accedan a un laboratorio físico.

El adquirir conocimientos prácticos es fundamental en una carrera ingenieril, lo que da pie al desarrollo de nuevas alternativas para lograrlo. La adopción de laboratorios virtuales brindará una ayuda estratégica para la adquisición de saberes y destrezas en el campo práctico.

## **1.4 Objetivos**

### ***1.4.1 Objetivo General***

Determinar las propiedades mecánicas de los materiales sometidos a tracción y compresión bajo normas utilizando laboratorios virtuales y software CAD.

### ***1.4.2 Objetivos específicos***

- Determinar las propiedades mecánicas del acero dulce y hierro fundido sometidos a tracción y compresión bajo normas utilizando laboratorios virtuales.
- Determinar las propiedades mecánicas del acero dulce y hierro fundido sometidos a tracción y compresión bajo normas utilizando el software CAD.

## **1.5 Hipótesis**

El uso de los laboratorios virtuales y software CAD harán viable la determinación de las propiedades mecánicas de los materiales acero dulce y hierro fundido sometidos a tracción y compresión bajo normas.

## **1.6 Variables de investigación**

### ***1.6.1 Variables independientes***

Laboratorios virtuales, software CAD

### ***1.6.2 Variables dependientes***

Propiedades mecánicas de los materiales sometidos a compresión y tracción bajo normas.

## Capítulo II

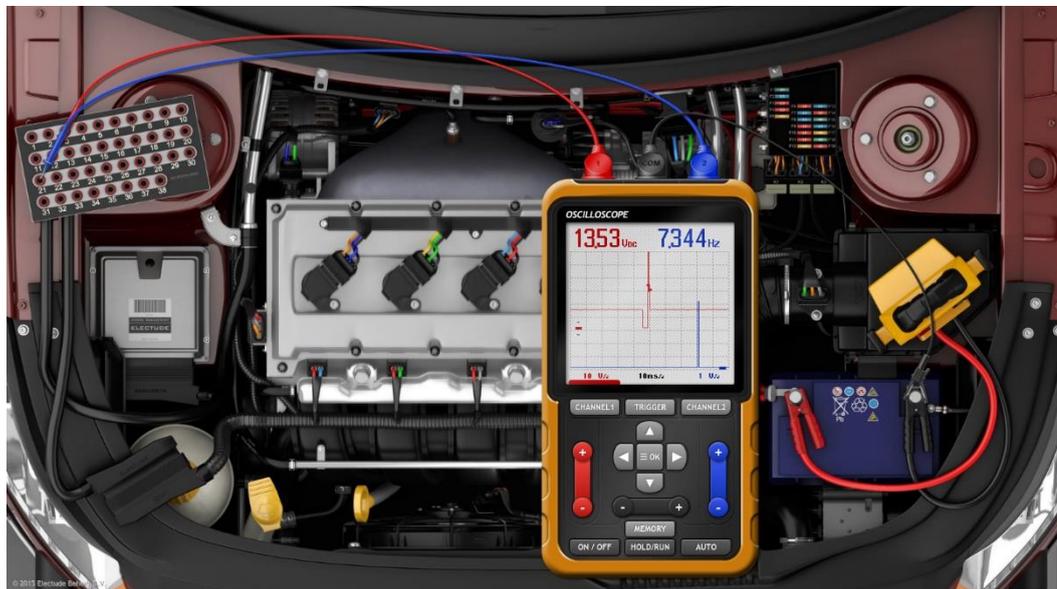
### 2. Marco teórico

#### 2.1 Laboratorios virtuales

En el mercado actual encontramos laboratorios virtuales para casi todos los campos de estudio, uno de los más conocidos y efectivos es ELECTUDE (figura 1), la cual es una plataforma con contenidos, animaciones y simulaciones para el ámbito técnico de aprendizaje.

**Figura 1**

*Plataforma ELECTUDE.*



*Nota.* Figura tomada de Electude. (s. f.). Electude Simulator Challenge [Ilustración]. Electude Simulator.

Otra opción es Mozaik Education una plataforma que tiene contenido en 3D para diversas categorías de estudio, las cuales beneficiarán a los estudiantes a que tengan una mejor comprensión de cada una de sus acciones como se observa en la figura 2 esta aplicación cuenta con una interfaz de realidad aumentada.

## Figura 2

### Interfaz del laboratorio Mozaik



*Nota.* Figura tomada de Mozaik. *Mozaik Education.*

Dentro de los laboratorios virtuales relacionados con el tema de ensayos mecánicos tenemos los siguientes

MVlab: Este laboratorio es un entorno virtual de trabajo en el cual se realiza ensayos de compresión, tracción, dureza, etc. Su interfaz se observa en la figura 3.

## Figura 3

### Interfaz del laboratorio virtual MVlab



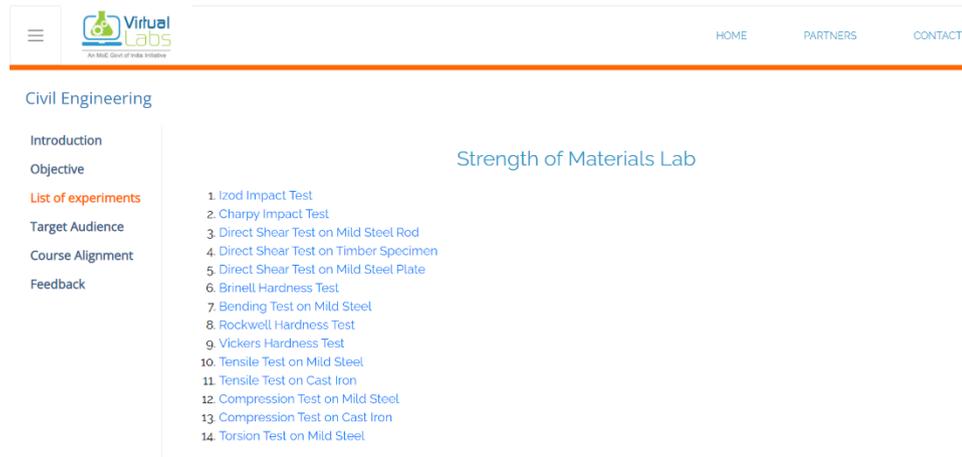
*Nota.* Figura tomada de Derematerialia. 18 noviembre 2021. Laboratorio virtual de materiales. Derematerialia.com.

El laboratorio virtual que servirá de base para la realización del estudio es Virtual

Labs perteneciente al NITK (National Institute of Technology Karnataka Surathkal). El mismo que es un laboratorio online, cuenta con información teórica, procedimientos, autoevaluaciones, simulador, videos y su bibliografía, tal como lo muestra la figura 4.

### Figura 4

#### Interfaz del laboratorio Virtual Labs



*Nota.* Figura tomada de Indian Institute of Technology Delhi. (s. f.). VirtualLabs [Ilustración]. Strength of Materials Lab. nts.

## 2.2 Software CAD

Complementando a los diferentes laboratorios virtuales, se tiene al software CAD, en el cual se realiza simulaciones de manera más exacta debido a su complejidad, dando una idea clara de cómo será la deformación que sufre el elemento al momento de realizar el respectivo estudio o práctica.

Debido a que los trabajos de los ingenieros, dibujantes y diseñadores requiere de cálculos matemáticos, se ha optado recientemente por un computador como una herramienta necesaria en la preparación de dibujos técnicos, debido a que de manera manual el proceso de dibujo y los cálculos tomaban grandes cantidades de tiempo y dinero, entonces con el empleo de la computadora se produce, modifica, almacena, envía y transmite dibujos originales y de muy buena calidad, a esto se conoce como diseño asistido por

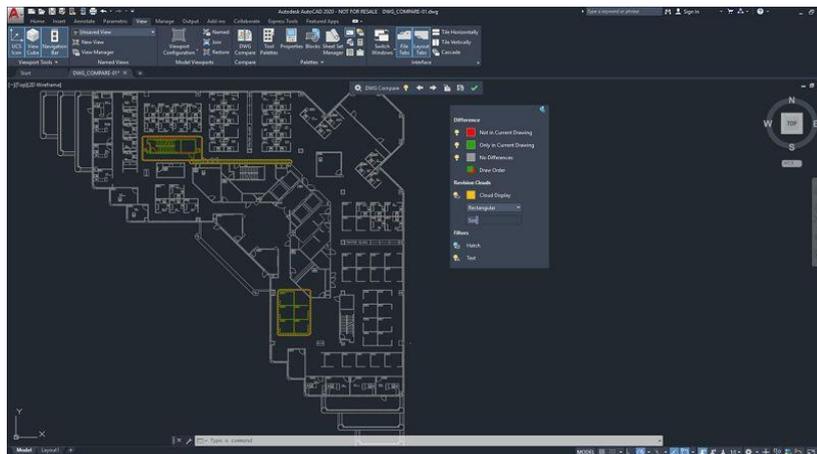
computadora (CAD). (Zapata Urán, 2015)

Dentro de la amplia gama de software CAD tenemos a los más utilizados dentro del ámbito estudiantil:

- AutoCAD: software desarrollado por la compañía Autodesk utilizado en la impresión 2D y 3D, dibujo de planos y creación de piezas. La herramienta está dirigida a profesionales, pero la compañía facilita el acceso a la misma con una licencia estudiantil por un año, cuya interfaz se muestra en la figura 5.

**Figura 5**

*Software AutoCAD*

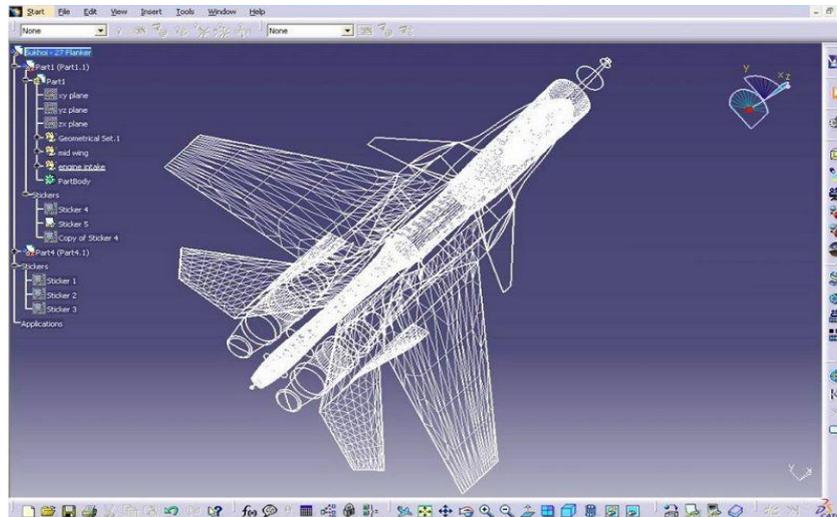


*Nota.* figura tomada de A. Felipe. (30 de octubre del 2021). *Los mejores programas CAD para estudiantes.* Wondershare.com.

- CATIA para estudiantes: ayuda en el diseño y desarrollo de productos e integra múltiples disciplinas, también cuenta con una multiplataforma que dispone de CAM (Manufactura asistida por computador) y CAE (Ingeniería asistida por computador), cuya interfase se muestra en la figura 6.

**Figura 6**

*Interfaz software CATIA*

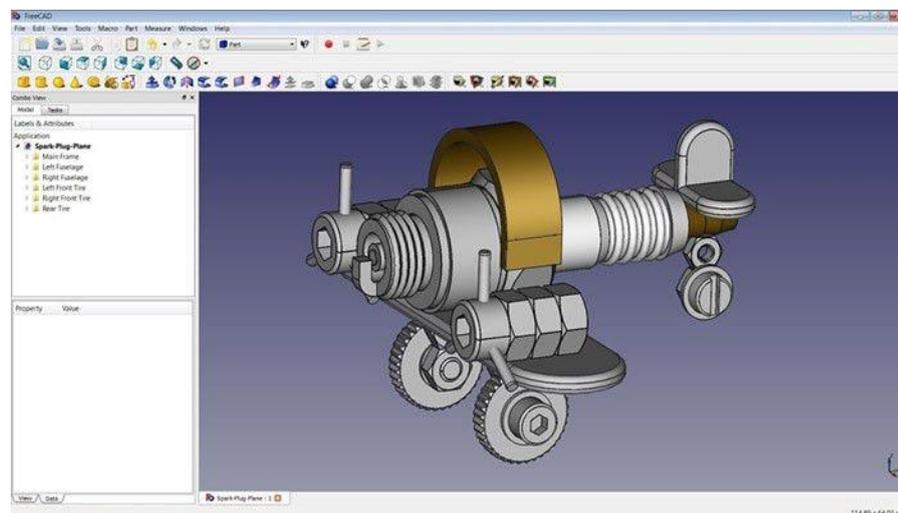


*Nota. figura tomada de A. Felipe. (30 de octubre del 2021). Los mejores programas CAD para estudiantes.*

- FreeCAD: herramienta de CAD 3D paramétrico que permite realizar diseños, está dirigido tanto a profesionales como a estudiantes cuya interfaz se muestra en la figura 7.

**Figura 7**

*Interfaz software FreeCAD*



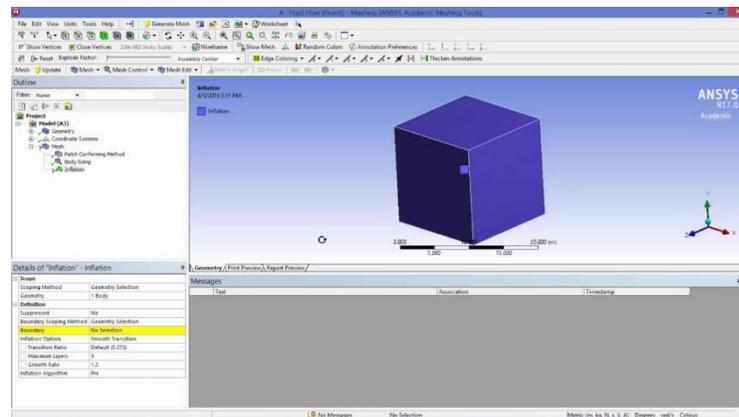
*Nota. figura tomada de A. Felipe. (30 de octubre del 2021). Los mejores programas CAD para estudiantes.*

- Ansys Student, la compañía brinda acceso gratuito a su plataforma basada en la aplicación Ansys Workbench. Dentro del cual figuran

Ansys Mechanical, Ansys CFD, Ansys SpaceClaim, entre otros (figura 8).

**Figura 8**

*Ansys Student*



*Nota.* Figura tomada de Ansys. Tomada el 19 de noviembre del 2021. Download Ansys Student. Ansys.com.

Las propiedades del Ansys Student permiten realizar simulaciones de gran precisión, los tipos de simulación que se pueden usar para los fines del estudio son: análisis estructural, análisis dinámico, análisis dinámico explícito. En el trabajo de investigación se utilizará el análisis dinámico explícito, es el que permite obtener la gráfica de esfuerzo – deformación para contrastar los resultados con los del laboratorio virtual (Brainon Engineers, 2020)

### 2.3 Propiedades Mecánicas

Según (Askeland, 2013) Las propiedades mecánicas de los materiales son características dependientes en gran parte de la composición, microestructura del material, la naturaleza de los enlaces, la estructura cristalina y los defectos que pueden presentar los materiales. Todas estas características influyen en la resistencia y ductilidad de los materiales metálicos. A partir de ello se generan los distintos conceptos definidos como las propiedades mecánicas que son dureza, esfuerzo deformación, deformación elástica y plástica entre otros.

## 2.4 Clasificación de ensayos de materiales

- Ensayos científicos: Deben ser realizados con precisión y con precauciones adecuadas a fin de obtener los valores más exactos posibles de propiedades desconocidas del material a estudiar.
- Ensayos de control – verificación: Se realizan para verificar si las propiedades de un lote cumplen con los objetivos esperados por los diseñadores o especificaciones requeridas.
- Ensayos de campo: Se realizan en los componentes de estructuras o máquinas que no se pueden llevar a un laboratorio, por lo general son menos precisos.
- Ensayos de laboratorio: realizado en las instalaciones adecuadas con la limpieza requerida para obtener un buen resultado.
- Ensayos destructivos: El material sufre rotura y no se puede utilizar nuevamente.
- Ensayos no destructivos: El material no sufre rotura, es posible realizar un nuevo ensayo posterior.

(Ruíz, 2006)

Cada uno de estos ensayos está regido por normas que son de vital importancia para poder comparar resultados y estandarizar los procedimientos a realizarse.

Dentro de las normas que rigen a los ensayos de los materiales están:

- IRAM: Instituto Argentino de Normalización.
- ISO: International Organization for Standardization.
- ASTM: American Society for Testing and Materials.

- BSI: British Standards Institution.
- ANSI: American National Standards Institute.
- DIN: Deutsches Institut Für Normung.

(Ruíz, 2006)

Los resultados darán las propiedades de los materiales, los cuales se pueden ver listados en la tabla 1.

**Tabla 1**

*Propiedades mecánicas y físicas de los materiales.*

<b>Clase</b>	<b>Propiedad</b>	<b>Clase</b>	<b>Propiedad</b>
<i>Físicas</i>	Dimensiones, formas, densidad o gravedad específica. Contenido de humedad Macroestructura Microestructura	Mecánicas	Resistencia, tensión, compresión, cortante y flexión estática, impacto, tenacidad, rigidez, elasticidad, fragilidad, dureza, resistencia al desgaste.

*Nota.* Tabla tomada de Espinoza Felipe (1982). Ensayos mecánicos en materiales.

Universidad Autónoma de León.

## 2.5 Máquina de ensayos universal

La máquina de ensayos universal es la base para realizar estudios de las propiedades mecánicas de materiales sometidos a esfuerzos de tensión, compresión o flexión. Para esto se requiere una probeta la cual irá fijada a la máquina por mordazas. (Alarcón Pupiales, 2018)

### Modelos

- Máquina universal de ensayos hidráulica: Máquina cuyo accionar de mordazas se da por medio de un fluido, denominadas mordazas hidráulicas, es una máquina multipropósito, su control puede ser manual o por tornillo sin fin como se visualiza en la figura 9. (Alarcón Pupiales, 2018)

### Figura 9

*Máquina de ensayos universal hidráulica*



*Nota.* Figura tomada de Servosis (6 de julio 2019). Máquina universal de ensayos, ¿qué es y por qué se llama así? Sevosis.com

- Máquina de ensayos universal electromecánica

Es una máquina completamente automática y multipropósito como se puede visualizar en la figura 10, para un amplio rango de materiales, posee un sistema digital de control y adquisición de datos. Su avance está predominado por un sistema de control avanzado de lazo cerrado. (UTEST, 2021)

### **Figura 10**

*Máquina de ensayos universal electromecánica*



*Nota.* Figura tomada de UPC, tomada el 20 de noviembre del 2021. Máquina universal electromecánica.upc.edu.ec.

## 2.6 Ensayo de tracción o tensión

Este ensayo se basa en las normas ISO 6892-1, ASTM A371, IS 1608, esta última tiene similitudes y equivalencias con las siguientes normas: ISO 286-2, ISO 377, ISO 2566-1, ISO 2566-2 e ISO 7500-1

Este es un ensayo estático el cual consiste en aplicar una fuerza axial a la probeta de estudio, un esfuerzo de tensión creciente, el cual se aplica hasta la rotura de la probeta para determinar una o más propiedades mecánicas.

El ensayo se lo debe realizar a temperaturas entre los 10 °C a 35 °C. Para una mejor comprensión del proceso de ensayo y la obtención de resultados se recomienda tener en cuenta las siguientes definiciones de las (ISO, 2010):

Longitud entre puntos (L): longitud de la parte cilíndrica o prismática de la probeta.

Longitud inicial entre puntos ( $l_0$ ): Longitud entre puntos sobre la probeta medida a temperatura ambiente antes del ensayo.

Longitud final entre puntos ( $l_u$ ): Longitud entre puntos sobre la probeta luego de la rotura a temperatura ambiente, y tras unir cuidadosamente las dos partes de la probeta de forma que sus ejes están en prolongación.

Alargamiento: Incremento en la longitud inicial entre puntos en cualquier momento durante el ensayo.

Rotura: Fenómeno que ocurre al producirse la separación total de la probeta en dos o cuando la fuerza disminuye hasta ser nominalmente cero.

(ISO, 2009)

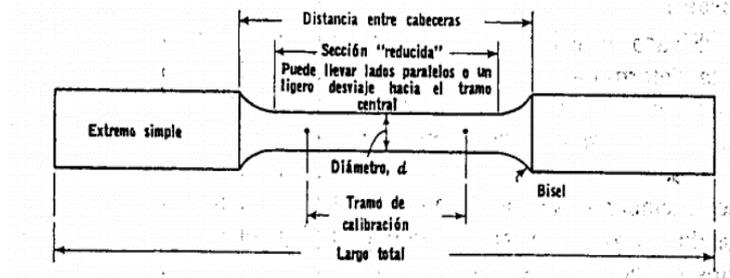
### ***Probetas de Tensión***

Las probetas para el ensayo de tensión se hacen de formas variadas, su sección transversal puede ser redonda, cuadrada o rectangular. Para metales se usa generalmente una probeta cilíndrica (figura 11), para láminas y placas suele usarse una probeta plana. De manera general la sección transversal central es de

menor valor que en sus extremos como lo muestra la figura para provocar una falla controlada en su sección donde los esfuerzos no resulten afectados por los dispositivos de sujeción. (Espinoza, 1982)

**Figura 11**

*Probeta correspondiente al ensayo de tensión*



*Nota.* El gráfico especifica los puntos a tomar en cuenta en una probeta para realizar el ensayo. Figura tomada de *Ensayos mecánicos en metales (p.37)*, por Espinoza, F. 1982. Universidad Autónoma de León.

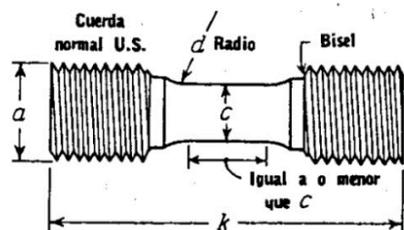
Bajo las normas estándar ASTM frecuentemente se usan las siguientes medidas básicas para las probetas de metales dúctiles:

$d$ : 0.505 in,  $A$ = 2.25 in.

Para el hierro fundido y acero dulce se usan probetas de las siguientes características mostradas en las figuras 12 y 13:

**Figura 12**

*Probeta correspondiente al ensayo de tensión para hierro fundido*



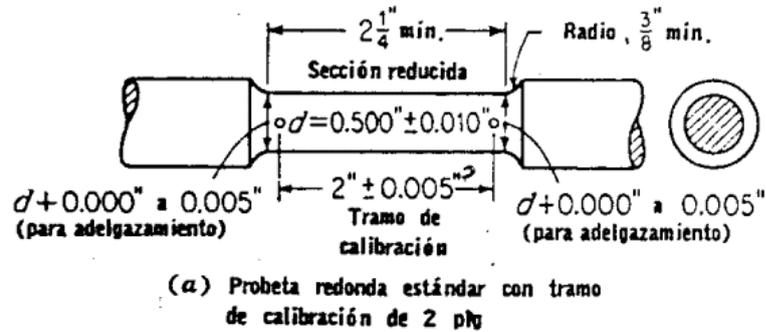
Dimensiones de probetas, plg			
Dimensión	Probeta A	Probeta B	Probeta C
$a$	$\frac{3}{4}$	$1\frac{1}{8}$	$1\frac{7}{8}$
$c$	0.500	0.750	1.25
$d$ , min.	1.00	1.00	2.00
$k$ , min.	3.75	4.00	$6\frac{3}{8}$

**FIG. 5.4.** Probeta redonda para ensayos de tensión ASTM Estándar para hierro fundido (ASTM E 8, A 48)

Nota. Figura tomada de *Ensayos mecánicos en metales* (p.38), por Espinoza, F. 1982. Universidad Autónoma de León.

### Figura 13

Probeta correspondiente al ensayo de tensión para acero dulce



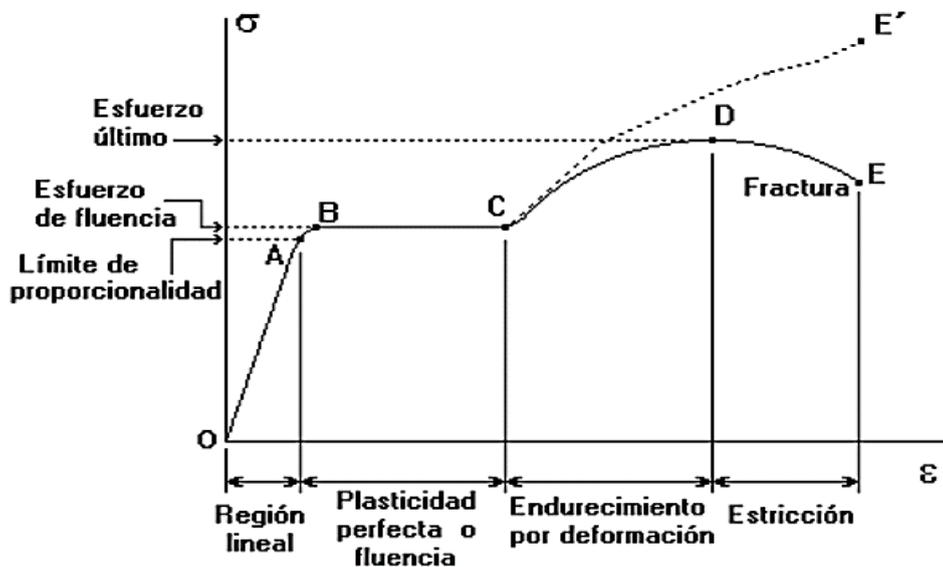
Nota. Medidas de la probeta para el ensayo de tensión en acero dulce, figura tomada de *Ensayos mecánicos en metales* (p.37), por Espinoza, F. 1982. Universidad Autónoma de León.

#### 2.10.1 Propiedades mecánicas

Como primer resultado se obtiene la gráfica de esfuerzo deformación (figura 14), tanto para el acero dulce como para el hierro fundido.

### Figura 14

Gráfica esfuerzo – deformación del ensayo en acero dulce.



*Nota.* La curva para el hierro fundido se obtiene de la misma manera. Figura tomada de Balbatín A. (2016), Ensayos y propiedades mecánicas de los materiales.

Dicis.ugto.mx.

Puntos de la gráfica esfuerzo deformación:

O: Comienzo del ensayo

A: Límite elástico

C: Incremento de la carga por endurecimiento

D: Carga máxima

E: Rotura

Interpretación del gráfico:

0-A: zona plástica, se representa por una recta que pone de manifiesto la proporcionalidad entre alargamiento y carga que la produce.

A-B: zona de alargamiento, representa un tramo que es la continuación de la recta. Se suma a los alargamientos elásticos una pequeña deformación que es recuperable con el tiempo.

B-C: zona de fluencia, comienza la deformación importante y permanente en el material sin que la carga tenga un aumento considerable

C-D: zona de alargamiento homogéneo, esta zona comienza luego del punto final de la zona de fluencia, aquí se produce el efecto de endurecimiento denominado "acritud".

D-E: zona de estricción, en este tramo la carga desciende hasta producir la fractura de la probeta. (Balbatín, 2016)

Con los resultados de la simulación se pueden obtener los valores de:

### **Esfuerzo**

Se puede obtener en cada punto de la prueba, teniendo en cuenta la fuerza aplicada sobre el área de la probeta.

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

Donde:

- $\sigma$ : esfuerzo
- F: fuerza aplicada
- A: área.

### **Deformación unitaria**

Se obtiene con la relación entre las longitudes inicial y final:

$$\varepsilon = \frac{l - l_0}{l_0}$$

Donde:

- $\varepsilon$ : deformación unitaria
- l: longitud final
- $l_0$ : longitud inicial

### **Módulo de elasticidad**

Se obtiene al calcular la pendiente de la recta que conforma el punto 0 y el punto A, o dicha de otra manera es la variación del esfuerzo sobre la variación de deformación:

$$E = \frac{\Delta\sigma}{\Delta\varepsilon}$$

Donde:

- E: módulo de elasticidad
- $\Delta\sigma$ : variación del esfuerzo
- $\Delta\varepsilon$ : variación de la deformación

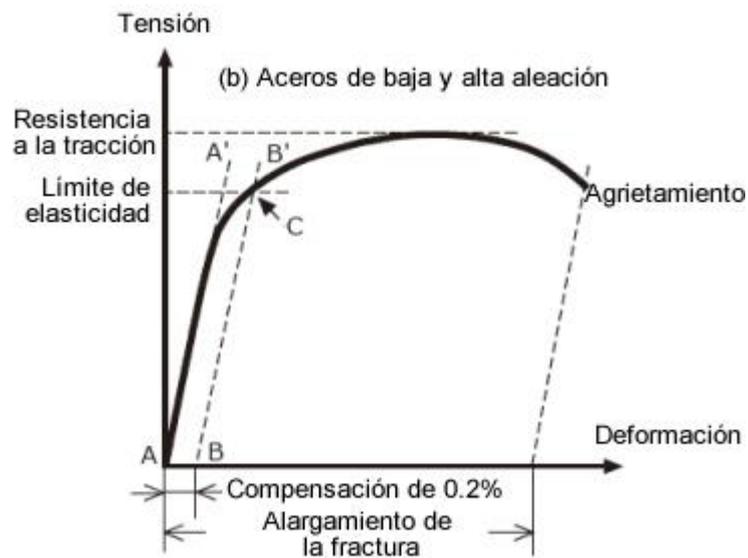
### **Esfuerzo de cedencia**

Punto en el cual el material pasa de la zona elástica y sufre una deformación permanente denominada plástica, tener en cuenta este esfuerzo es muy importante debido a que este es el punto máximo que resiste un material antes del fallo (Balbatín, 2016). Se obtiene de la siguiente manera gráfica:

Se debe construir paralela a un 0.2% del valor de deformación máxima, distanciada de la línea recta de la gráfica de esfuerzo – deformación como se observa en la figura 15.

**Figura 15**

*Gráfica del esfuerzo de cedencia B-B'*



*Nota.* Figura tomada de (Kobelco, 2021).

### Porcentaje de elongación

Indicará la ductilidad que tenga el material, este valor se obtendrá de la relación entre las longitudes inicial y final:

$$\% \text{ elongación} = \frac{L_f - L_o}{L_o} * 100$$

Donde:

- $L_f$ : longitud final
- $L_o$ : es la longitud inicial
- \* 100 para obtener un valor en porcentaje

Según (Beer, Johnston, Dewolf, & Mazurek, 2009) para aceros comúnmente usados los cuales tengan una resistencia de fluencia de hasta 344.74 MPa

el porcentaje de elongación es de 21%.

### **Porcentaje de reducción de área**

La ductilidad también se puede mostrar de la siguiente manera relacionando las áreas inicial y final.

$$\% \text{ red Área} = \frac{A_o - A_f}{A_o} * 100$$

Donde:

- $A_o$ : área inicial
- $A_f$ : área final
- \* 100 para obtener un valor de porcentaje

Según (Beer, Johnston, Dewolf, & Mazurek, 2009) se tiene un porcentaje de reducción de área de un 60 al 70%.

### **Esfuerzo máximo**

Es el cociente entre la carga máxima y sección inicial de la probeta.

$$\sigma_{ET} = \frac{\text{carga máxima}}{A_o}$$

Donde:

- $\sigma_{ET}$ : esfuerzo máximo
- $A_o$ : área inicial

### **Esfuerzo de rotura**

Se define como el cociente de la carga de rotura y la sección inicial de la probeta.

$$\sigma_R = \frac{\text{carga de rotura}}{A_o}$$

Donde:

- $\sigma_R$ : esfuerzo de rotura
- $A_o$ : área inicial

### **Límite de proporcionalidad**

En este punto finaliza la parte recta de la gráfica y se deja de cumplir la ley de Hooke y deja de haber proporcionalidad entre la tensión y deformación.

$$\sigma_p = \frac{\text{carga límite de proporcionalidad}}{A_o}$$

Donde:

- $\sigma_p$ : esfuerzo máximo
- $A_o$ : el área inicial

### **Deformación**

Hace referencia al cambio en las dimensiones estructurales del material cuando se encuentra sometido a carga externa.

$$\Delta l = l_f - l_o$$

Donde:

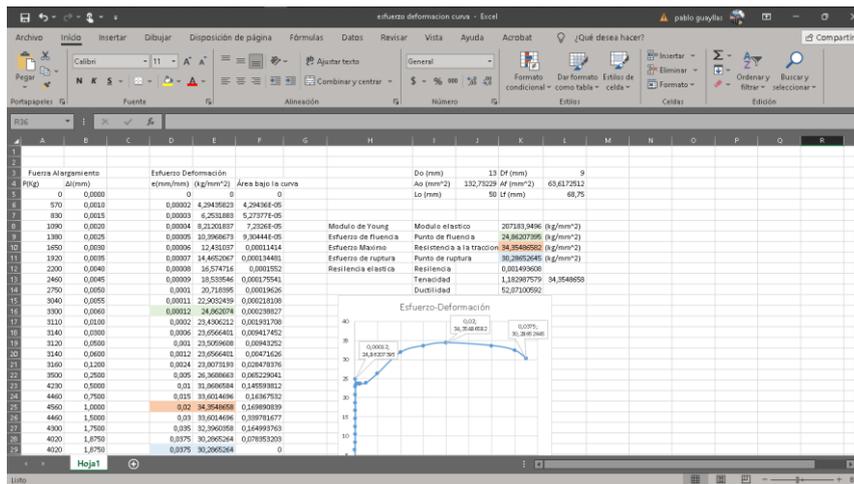
- $\Delta l$ : deformación del material
- $l_o$ : longitud inicial
- $l_f$ : longitud final

### **Uso de software excel**

Para complementar el estudio realizado se puede usar el software excel, el mismo que permitirá obtener la gráfica correspondiente al ensayo, según los valores que se hayan dado a la probeta en el ensayo, en la figura 16 se observa la aplicación de este programa.

### **Figura 16**

*Uso del software Excel en ensayos.*



Nota. En la imagen se puede visualizar el diagrama o curva que corresponde al ensayo según los valores que se obtienen del laboratorio virtual.

### Fractura de probetas

Una vez realizado el ensayo se tendrá como resultado una probeta fracturada en dos partes, dependiendo del tipo de material del que esté compuesta la probeta estas fracturas serán:

Fractura dúctil: Presenta un adelgazamiento de la zona de fractura y un labio de corte el cual forma un ángulo de  $45^\circ$  con la dirección del esfuerzo (figura 17).

Figura 17

Fracturas de probetas dúctiles

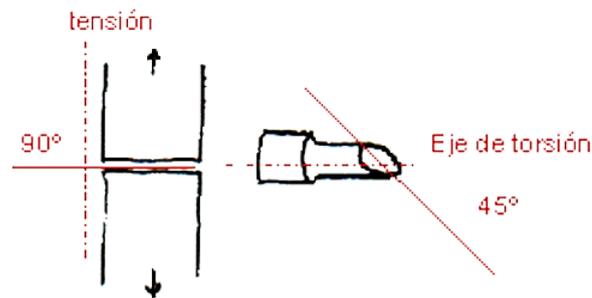


Nota. Figura tomada de (Balbatín, 2016)

Fractura frágil: caracterizada por no presentar deformación plástica ni estricción. Su dirección forma ángulos concretos con la dirección de la tensión máxima (figura 18).

## Figura 18

### Fractura de materiales frágiles



Nota. Figura tomada de (Balbatín, 2016)

## 2.7 Ensayo de compresión

Este ensayo comprende la aplicación uniaxial gradualmente creciente hasta que ocurre la falla, la carga se aplica a los extremos de una probeta de manera aplastante (Balbatín, 2016). El ensayo se basa en la norma IS 13780 (Hardmetals – Compression Test), la cual es idéntica a la norma ISO 4509 titulada de igual manera.

Las probetas para este ensayo poseen geometría cilíndrica o prismática constante en toda su longitud.

Este ensayo es menos utilizado que el ensayo de tracción se emplea para conocer el comportamiento del material bajo cargas aplastantes que puedan deformar un material de manera permanente (Balbatín, 2016).

### **Requerimientos para las probetas del ensayo a compresión**

Se prefiere la sección circular a otras geometrías, pero también son usadas las formas cuadradas y rectangulares. Una probeta adecuada mantendrá una relación de 10 como límite entre su altura y diámetro, y una relación mínima de 2 para obtener buenos resultados, las medidas estándar se presentan en la figura 19.

## Figura 19

### Dimensiones estándar para probetas sujetas a compresión

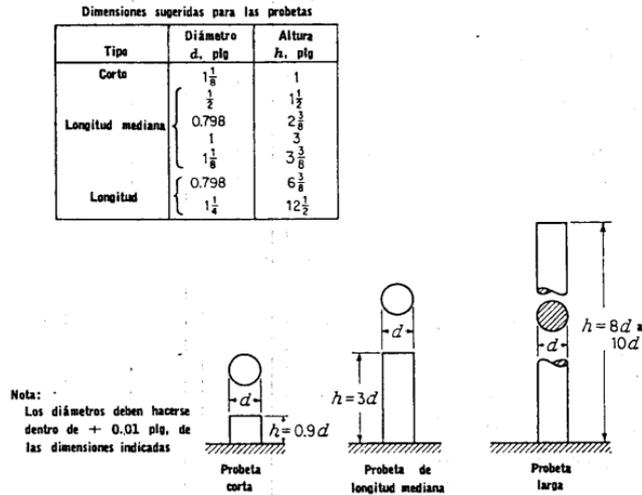


FIG. 5.25. Las probetas para ensayos de compresión de materiales metálicos de formas no similares (ASTM E 9)

Nota. Figura tomada de (Espinoza, 1982)

En la figura 20 se encuentra una tabla de velocidades a tomar en cuenta para realizar el ensayo de compresión en una máquina de ensayos universal.

**Figura 20**

*Dimensiones estándar para probetas sujetas a compresión*

Material probado	Referencia	Máxima velocidad del puente plg por min	Velocidad de carga, lb/plg <sup>2</sup> /seg	Tiempo para aplicar la segunda mitad de la carga, seg
Materiales metálicos ....	E 9-33 T*			
De 1 a 3 plg de largo . . . . .	.....	0.05		
De 3 plg o más . . . . .	.....	0.10		
Concreto . . . . .	C 39	0.05	20-50	
Mortero . . . . .	C 109	.....	.....	20-80†
Madera . . . . .	D 143			
Paralelamente a la fibra . . . . .	.....	0.024		
Perpendicular a la fibra . . . . .	.....	0.012		
Ladrillo . . . . .	C 67	.....	.....	60-120
Loseta de barro . . . . .	C 112	0.05		
Plásticos . . . . .	D 695	0.05 hasta el punto de cedencia entonces		
	D 953	0.20 a 0.25		
		0.05		

Nota. Figura tomada de (Espinoza, 1982)

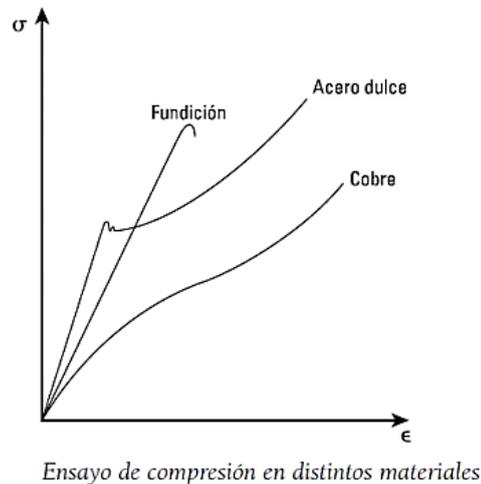
**2.11.1 Gráfica, resultados y fórmulas a obtener del ensayo de compresión.**

Gracias a los datos obtenidos se puede realizar la gráfica de esfuerzo –

deformación del ensayo a compresión del acero dulce y hierro fundido como lo muestra la figura 21.

### Figura 21

Gráfica de esfuerzo – deformación en el acero dulce y hierro fundido.



Nota. Figura tomada de (Balbatín, 2016)

#### Resultados a obtener

**Tensión al límite de proporcionalidad:** En este punto finaliza la parte recta del gráfico, por ende, en este límite no se cumple la ley de Hooke. A partir de este punto las tensiones no serán proporcionales a las deformaciones.

$$\sigma_P = \frac{\text{Carga al límite proporcional}}{A_o}$$

Donde:

- $\sigma_p$ : el esfuerzo máximo
- $A_o$ : área inicial

**Tensión máxima:** Es la carga máxima relacionada con la sección inicial de la probeta

$$\sigma_{EC} = \frac{\text{Carga máxima}}{A_o}$$

Donde:

- $\sigma_{EC}$ : esfuerzo máximo de compresión

- $A_o$ : el área inicial

**Acortamiento porcentual:**

$$\delta = \frac{L_o - L_f}{L_o} * 100$$

Donde:

- $\delta$ : acortamiento porcentual
- $L_o$ : es la longitud inicial
- $L_f$ : es la longitud final
- \* 100 para obtener la relación porcentual

**Módulo secante:**

Es el valor de la pendiente de una recta que pase por el punto y un punto de deformación seleccionado de manera arbitraria como valor final. (Instron, s.f.)

**Módulo tangente:**

Es el valor de la pendiente de una recta que pase por un punto de deformación tangente seleccionado de manera arbitraria. (Instron, s.f.)

**Momento de inercia:**

Es la medida que manifiesta la distribución de masas de un cuerpo en rotación respecto a un eje seleccionado de giro. Esta medida depende únicamente de la geometría del cuerpo y no de las fuerzas que actúen sobre el mismo.

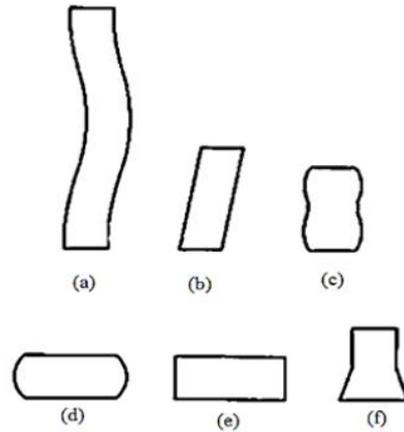
(CLASESDEMECANICA, s.f.)

**Patrones de falla:**

Dentro del ensayo de compresión se puede predecir su patrón de falla según la relación que posea el material dúctil entre la longitud sobre diámetro, estas fallas estarán expuestas en la figura 22.

**Figura 22**

*Patrones de falla en un material dúctil en función de L/D*



*Nota.* Cuando  $L/D$  es: Mayor a 5 la probeta pandea; mayor a 2,5 la probeta sufre cizallamiento; cuando es mayor a 2 la probeta presenta un doble cañón siempre que la fricción esté presente; cuando es menor a 2 y la probeta presenta fricción sufre barrelling; cuando es menor a 2 y no existe fricción se produce una compresión homogénea; la última figura corresponde a una falla de inestabilidad compresiva en el material de trabajo. Figura tomada de Indian Institute of Technology Delhi. (s. f.). VirtualLabs [Ilustración]. Strength of Materials Lab.

## Capítulo III

### 3. Metodología

El proceso para la comprobación de hipótesis se inicia con el uso del laboratorio virtual, el primer ensayo a realizar es el de tensión.

#### 3.1 Proceso del ensayo de tensión

##### 3.1.1 Acero Dulce

Para el proceso de ensayo de tensión se van a requerir los siguientes elementos:

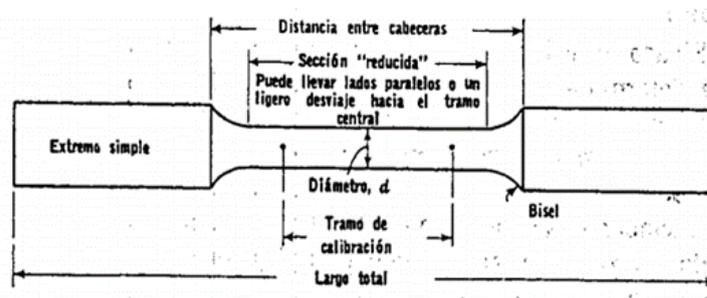
- Probeta de tensión del material a estudiar.
- Simulador VirtualLabs.
- Elementos de medición: Calibrador vernier y regla.

##### - Primer paso:

Medir con el calibrador el diámetro de la probeta ( $d$ ) y su longitud ( $A$ ) como muestra la figura 23. Las medidas según la normativa IS 1608 se muestran en las figuras 24 y 25.

#### Figura 23

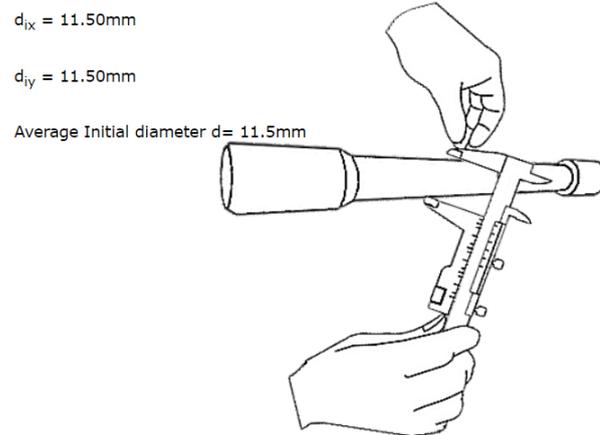
*Puntos de referencia de la probeta*



*Nota.* Distancias a tomar la medida, figura tomada de (Espinoza, 1982)

#### Figura 24

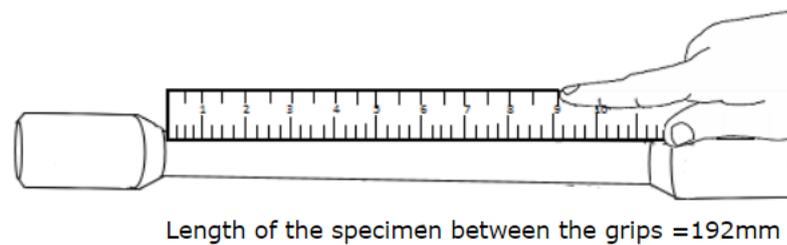
*Medidas utilizadas en el laboratorio virtual bajo la norma IS 1608*



*Nota.* El diámetro se debe medir dos veces de manera perpendicular, y se obtiene un diámetro promedio. Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Mild Steel, Virtual Labs.

### Figura 25

*Medidas utilizadas en el laboratorio virtual bajo la norma IS 1608*



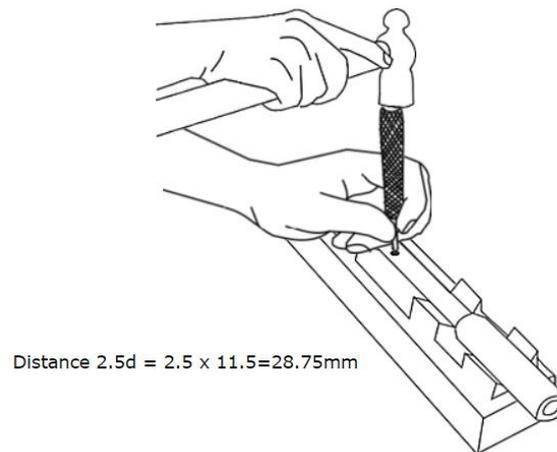
*Nota.* La medición de la longitud se hace con una regla debido a la longitud que tiene la probeta. Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Mild Steel, Virtual Labs.

#### - Segundo Paso:

Realizar marcas a distancias de  $2.5*d$  desde el inicio de A como se muestra en la figura 26.

### Figura 26

*Puntos de referencia a realizar en la probeta*



*Nota.* Los puntos serán tomados desde el inicio de la sección reducida de la probeta.

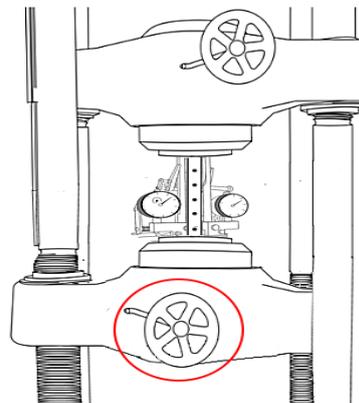
Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Mild Steel, Virtual Labs.

- **Tercer paso**

Ajustar y fijar la probeta en la máquina de ensayos universal; colocar el extensómetro en su posición como se muestra en la figura 27.

**Figura 27**

*Ajuste de la probeta en la máquina en conjunto con el extensómetro.*



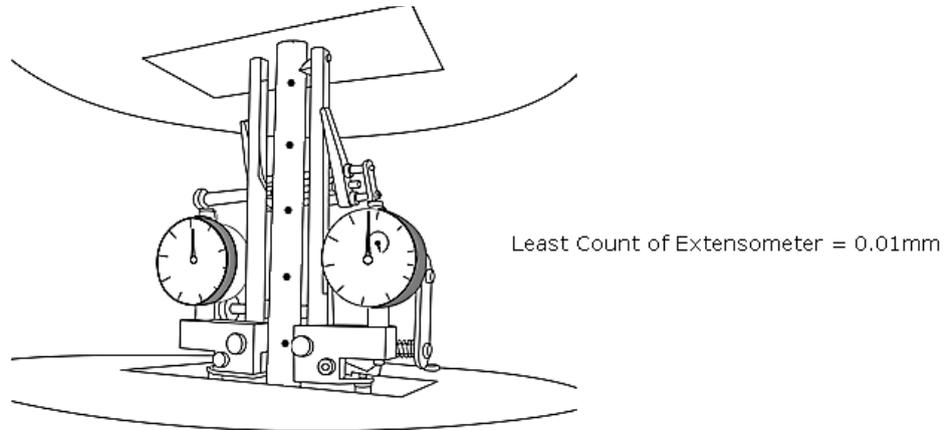
*Nota.* Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Mild Steel, Virtual Labs.

- **Cuarto Paso**

Encerar el extensómetro como lo muestra la figura 28.

## Figura 28

### Verificación del extensómetro



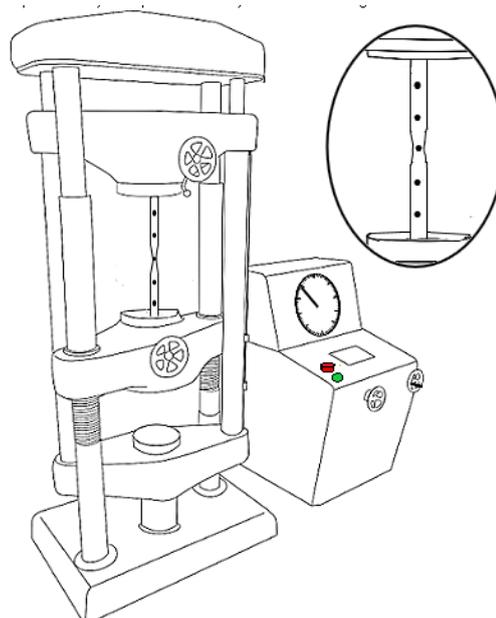
*Nota.* El extensómetro debe marcar cero en su carátula, con una tolerancia de 0.01 mm. Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Mild Steel, Virtual Labs.

### - Quinto Paso

Ajustar la magnitud de la tensión requerida en el estudio y aplicarla a la probeta como lo muestra la figura 29.

## Figura 29

### Ajuste de la carga o tensión requerida y aplicación de esta a la probeta



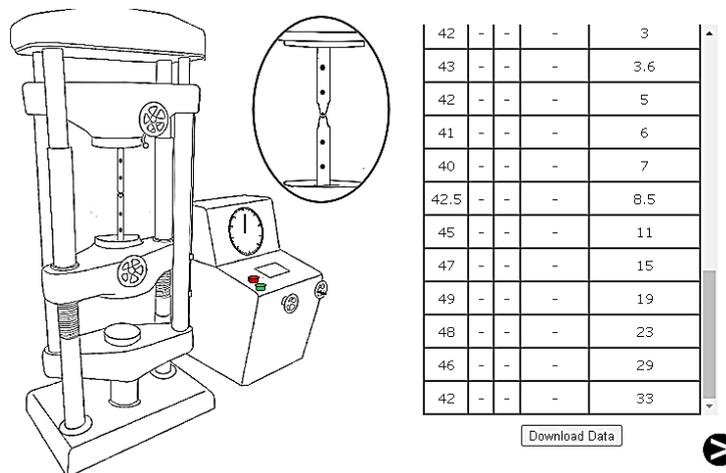
*Nota.* Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Mild Steel, Virtual Labs.

- **Sexto paso**

Obtener los datos y las gráficas de la simulación, los cuales se observan en las figuras 30, 31 y 32. Los datos obtenidos como resultados del laboratorio virtual se ven en la tabla 3 la cual está en el punto de Cálculo de las propiedades mediante el software Excel.

**Figura 30**

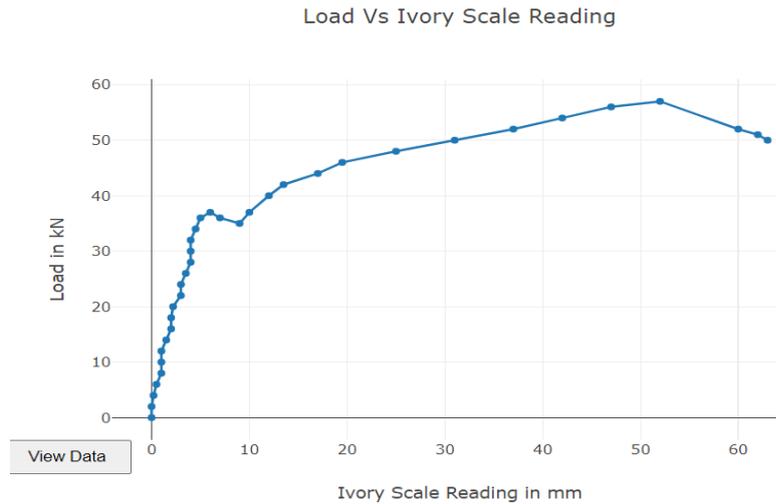
*Pantalla de datos obtenidos en la simulación realizada*



*Nota.* Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Mild Steel, Virtual Labs.

**Figura 31**

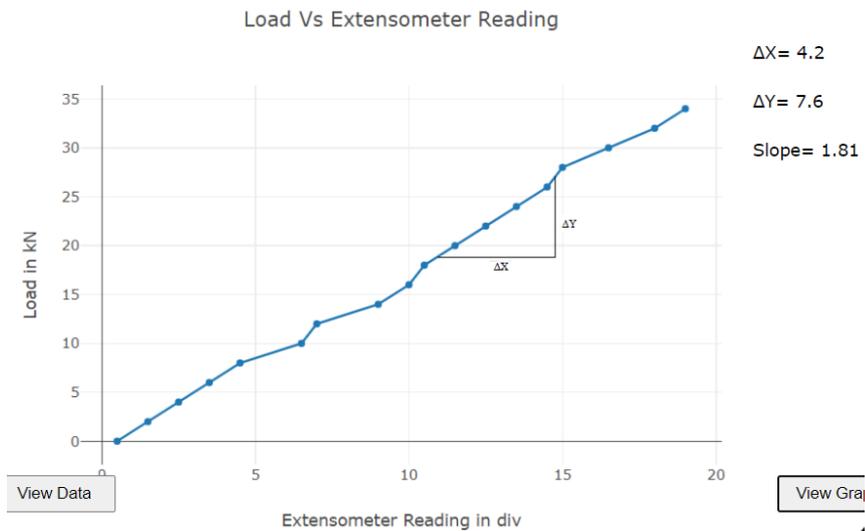
*Gráfica obtenida en función de los datos de fuerza y deformación*



*Nota.* La deformación se lee en milímetros y la carga en kilo Newtons. Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Mild Steel, Virtual Labs.

### Figura 32

*Gráfica obtenida en función de los datos de los extensómetros*



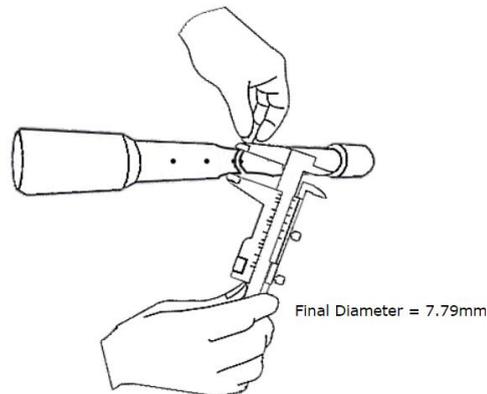
*Nota.* La lectura del extensómetro se realiza en divisiones y la carga en kilo Newtons, también se obtiene la pendiente de la gráfica tomando valores arbitrarios. Figura tomada de The Virtual Lab (2020).

### - Séptimo Paso

Retirar la probeta de la máquina y medir los resultados obtenidos como lo muestra la figura 33.

**Figura 33**

*Medición de (W) en el punto más cercano a la rotura de la probeta.*



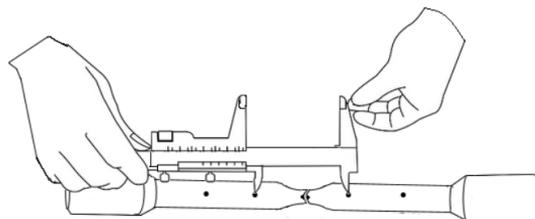
*Nota.* Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Mild Steel, Virtual Labs.

- **Octavo paso**

Medir la longitud entre puntos marcados en la probeta como lo muestra la figura 34. En la figura 35 se observa la tabla final de valores que se obtienen en el laboratorio virtual.

**Figura 34**

*Medición de G de la probeta.*



*Nota.* Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Mild Steel, Virtual Labs.

**Figura 35**

*Valores obtenidos en el laboratorio virtual*

Result	Actual Value
Yield Stress(N/mm <sup>2</sup> )	356.39
Tensile Strength(N/mm <sup>2</sup> )	549.03
Modulus of Elasticity(GPa)	209.09
Percentage Elongation(%)	30.5
Percentage reduction in area(%)	54.11

*Nota.* Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Mild Steel, Virtual Labs.

### **Cálculo de las propiedades mediante el software Excel**

Los datos obtenidos por el laboratorio virtual serán tabulados en el software Excel, el cuál calculará las propiedades mecánicas mencionadas en el marco teórico del estudio, para lo cual se utilizarán los valores que el simulador aplica a la probeta para realizar los ensayos tanto del acero dulce como del hierro fundido.

En la tabla 2 se reflejan los datos iniciales y finales de la probeta que se ha utilizado en el laboratorio virtual.

#### **Tabla 2.**

*Valores iniciales y finales de la probeta de acero dulce utilizada.*

<i>Do (mm)</i>	11,5	<i>Df (mm)</i>	7,79
<i>Ao (mm<sup>2</sup>)</i>	103,87	<i>Af (mm<sup>2</sup>)</i>	47,661
<i>Lo (mm)</i>	192	<i>Lf (mm)</i>	214,64
<i>L cal. (mm)</i>	59,24	<i>L cal f</i>	77,31

*Nota.* L cal. Hace referencia a la longitud calibrada, son los puntos tomados antes del ensayo que corresponden al centro de la probeta y un punto aledaño por los dos lados, y L cal f es la medida de estos puntos luego de que se ha realizado el ensayo de tracción.

#### **Tabla 3.**

*Valores aplicados por el simulador a la probeta*

Fuerza P(KN)	Alargamiento $\Delta l$ (mm)
0	0
2	0
4	0,2
6	0,5
8	1
10	1
12	1
14	1,5
16	2
18	2
20	2,2
22	3
24	3
26	3,5
28	4
30	4
32	4
34	4,5
36	5
37	6
36	7
35	9
37	10
40	12
42	13,5
44	17
46	19,5
48	25
50	31
52	37
54	42
56	47
57	52
52	60
51	62
50	63

*Nota.* La tabla tiene los valores de carga y alargamiento a los que ha sido sometida la probeta.

A partir de estos datos se calcula el esfuerzo y la deformación a la que está sometida la probeta utilizada tal como lo muestra la tabla 4.

**Tabla 4.**

*Valores de esfuerzo, deformación y el área bajo la curva a lo largo del ensayo*

realizado

Deformación e(mm/mm)	Esfuerzo (N/mm <sup>2</sup> )	Área bajo la curva
0	0	0,000
0,000	19,255	0,000
0,003	38,510	0,098
0,008	57,765	0,244
0,017	77,020	0,569
0,017	96,275	0,000
0,017	115,530	0,000
0,025	134,785	1,056
0,034	154,040	1,219
0,034	173,295	0,000
0,037	192,550	0,618
0,051	211,805	2,730
0,051	231,060	0,000
0,059	250,316	2,031
0,068	269,571	2,194
0,068	288,826	0,000
0,068	308,081	0,000
0,076	327,336	2,682
0,084	346,591	2,844
0,101	356,218	5,932
0,118	346,591	5,932
0,152	336,963	11,539
0,169	356,218	5,851
0,203	385,101	12,514
0,228	404,356	9,995
0,287	423,611	24,459
0,329	442,866	18,283
0,422	462,121	42,011
0,523	481,376	47,780
0,625	500,631	49,730
0,709	519,886	43,067
0,793	539,141	44,692
0,878	548,769	45,911
1,013	500,631	70,858
1,047	491,004	16,739
1,063	481,376	8,207

Luego de haber obtenido estos valores se calculan las propiedades

mecánicas en base a la teoría vista en el capítulo II, los resultados se muestran en la tabla 5.

**Tabla 5.**

*Resultado de las diferentes propiedades mecánicas calculadas mediante el software*

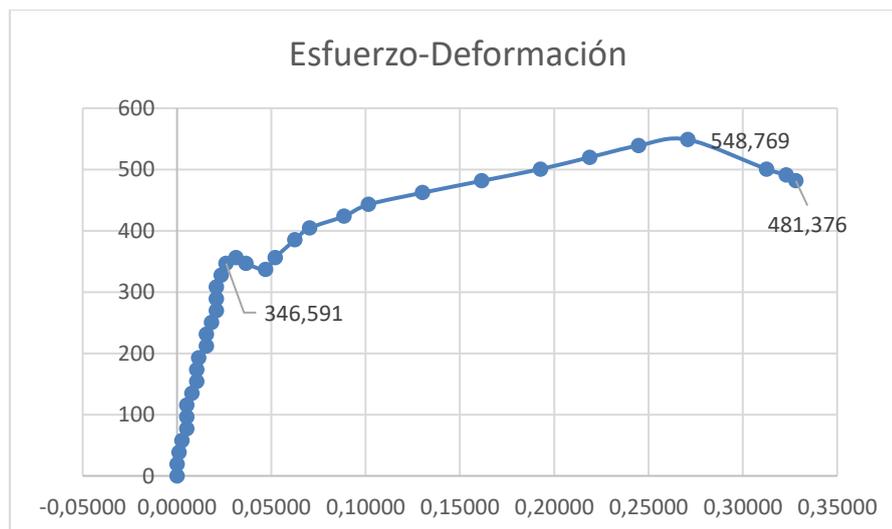
excel

<b>Modulo elástico</b>	13,9663	GPa	
<b>Punto de fluencia</b>	356,218	(N/mm <sup>2</sup> )	
<b>Resistencia a la tracción</b>	548,7687	(N/mm <sup>2</sup> )	
<b>Punto de rotura</b>	481,38	(N/mm <sup>2</sup> )	
<b>Resiliencia</b>	4300,5283	(N/mm <sup>2</sup> )	
<b>Tenacidad</b>	8295,7722	(N/mm <sup>2</sup> )	
<b>Ductilidad:</b>			
<b>% de elongación</b>	30,50	%	Para aceros más usados el % de elongación es un 21%
<b>% de reducción de área</b>	54,11	%	Para acero estructural es común encontrar un 60 - 70% de reducción de área

Para la verificación del resultado del software excel se grafica los datos de esfuerzo – deformación (figura 36) y se debe obtener una curva idéntica a la que da el laboratorio virtual.

**Figura 36**

*Gráfica obtenida en el software excel*



### 3.1.2 Hierro fundido

#### Procedimiento

De igual manera que con el acero dulce el ensayo se lleva a cabo con una

probeta cilíndrica con los siguientes pasos:

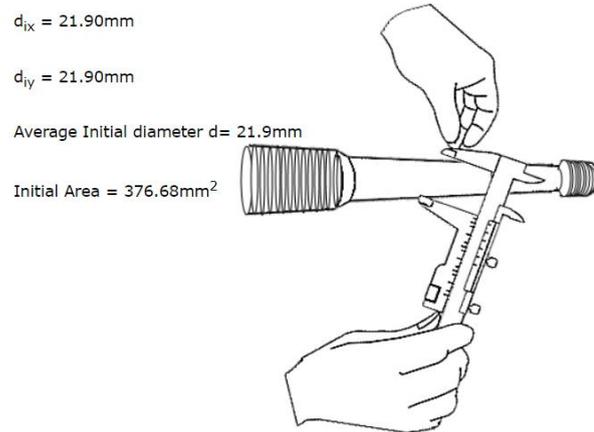
- Primer paso

Se debe medir el diámetro de la probeta como se muestra en la figura

37.

### Figura 37

*Medición del diámetro de la probeta y cálculo del área inicial*

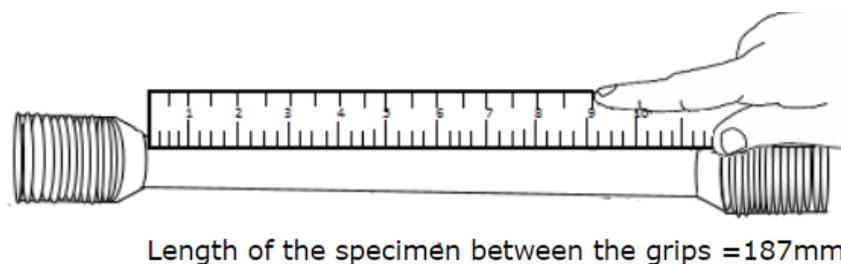


*Nota.* Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Cast Iron, Virtual Labs.

Luego medir la longitud de la probeta como se muestra en la figura 38

### Figura 38

*Medida de la longitud de la probeta*



*Nota.* Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Cast Iron, Virtual Labs.

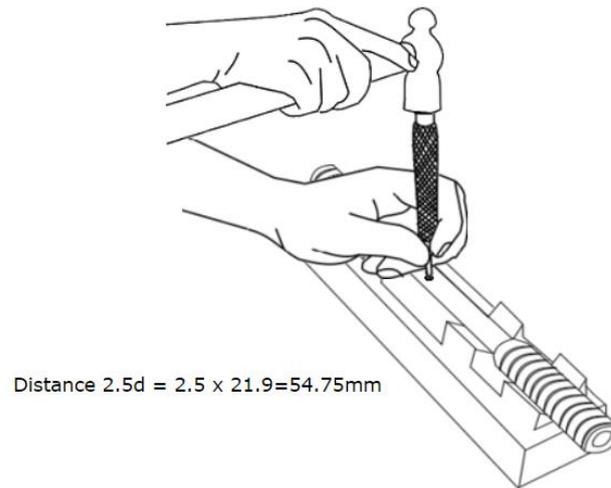
### Segundo Paso:

Realizar marcas a distancias de  $2.5 \cdot d$  desde el inicio como se muestra en la figura

39.

### Figura 39

*Puntos de referencia a realizar en la probeta*



*Nota.* Los puntos serán tomados desde el inicio de la sección reducida de la probeta.

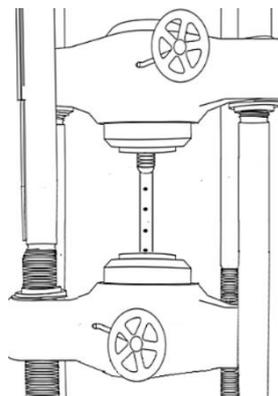
Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Cast Iron, Virtual Labs.

#### - Tercer paso

Ajustar y fijar la probeta en la máquina de ensayos universal; colocar el extensómetro en su posición como se muestra en la figura 40.

### Figura 40

*Ajuste de la probeta en la máquina*



*Nota.* Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Cast Iron, Virtual Labs.

### Cuarto Paso

Encerar comparador de carátula como lo muestra la figura 41.

#### Figura 41

*Encerado del comparador de carátula*



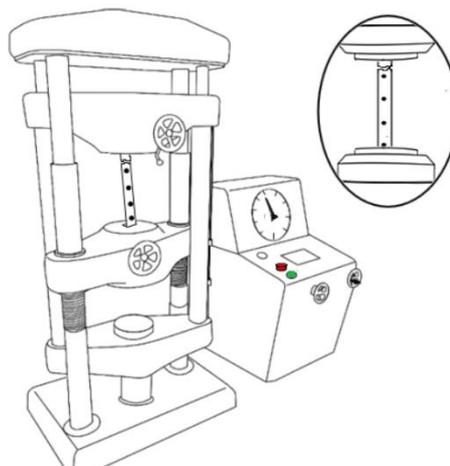
*Nota.* Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Cast Iron, Virtual Labs.

### Quinto Paso

Iniciar el ensayo con los ajustes prestablecidos en el laboratorio virtual como lo muestra la figura 42.

#### Figura 42

*Inicio del ensayo de tracción*



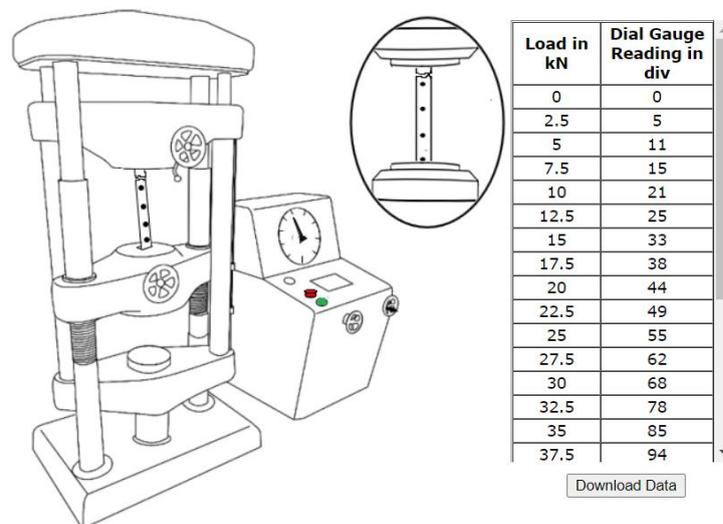
*Nota.* Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Cast Iron, Virtual Labs.

### Sexto paso

Obtener los datos y las gráficas del laboratorio, los cuales se observan en las figuras 43, 44 y 45. Los datos obtenidos como resultados del laboratorio virtual se ven en la tabla 3 la cual está en el punto de Cálculo de las propiedades mediante el software Excel. En la figura 46 se observa los resultados que da el laboratorio en cuanto a las propiedades del material hierro fundido.

### Figura 43

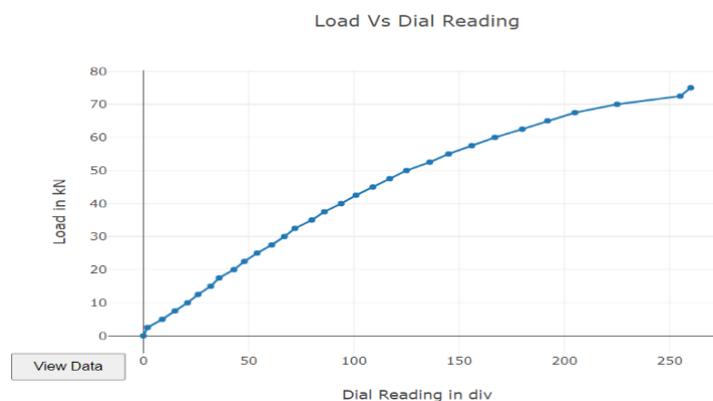
*Pantalla de datos obtenidos en la simulación realizada*



*Nota.* Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Cast Iron, Virtual Labs.

### Figura 44

*Gráfica obtenida en función de los datos de fuerza y deformación*

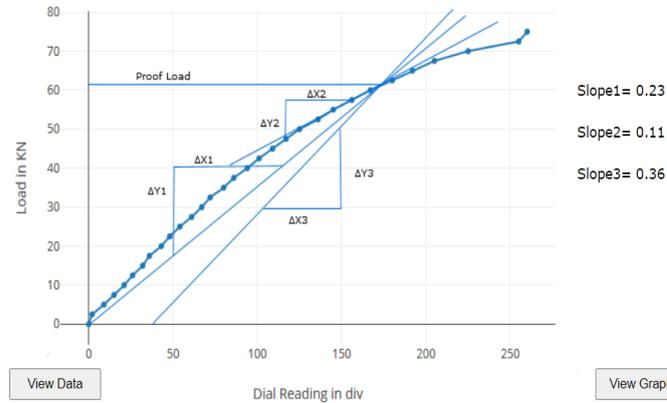


*Nota.* La deformación se lee en milímetros y la carga en kilo Newtons. Figura tomada

de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Cast Iron, Virtual Labs.

### Figura 45

*Pendiente de la gráfica en función de los datos obtenidos del laboratorio virtual*



*Nota.* La lectura del extensómetro se realiza en divisiones y la carga en kilo Newtons, también se obtiene la pendiente de la gráfica tomando valores arbitrarios.

Figura tomada de.

### Figura 46

*Resultados de las propiedades mecánicas dadas en el laboratorio virtual*

Result	Actual Value
Proof Stress(N/mm <sup>2</sup> )	156.71
Tensile Strength(N/mm <sup>2</sup> )	199.21
Secant Modulus(GPa)	17.09
Tangent Modulus(GPa)	10.88
Modulus of Elasticity(GPa)	21.36

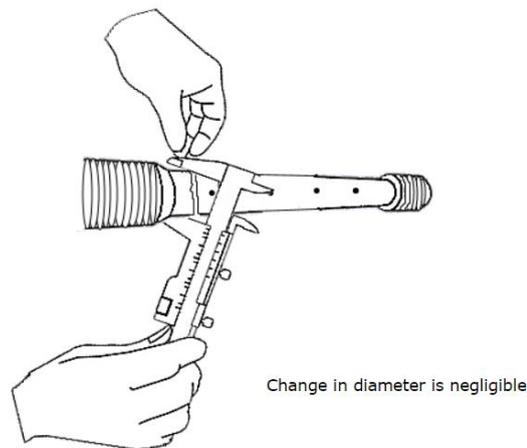
*Nota.* Los resultados de este ensayo se comprobarán más adelante en el software excel. Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Cast Iron, Virtual Labs.

### Séptimo Paso

Retirar la probeta de la máquina y medir los resultados obtenidos como lo muestra la figura 47.

**Figura 47**

Medición de  $(W)$  en el punto más cercano a la rotura de la probeta.



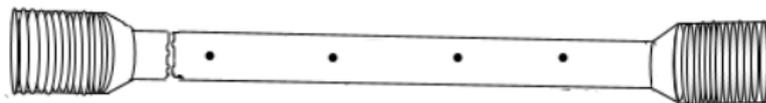
*Nota.* El cambio en el diámetro de la probeta utilizada es despreciable debido a que el material es frágil. Figura tomada de The Virtual Lab (2020).

**Octavo paso**

Medir la longitud entre puntos marcados en la probeta como lo muestra la figura 48.

**Figura 48**

Medición de  $G$  de la probeta.



Change in length is negligible

*Nota.* De igual manera el cambio en la longitud de la probeta es despreciable por ser una fractura de material frágil. Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Tensile Test on Cast Iron, Virtual Labs.

- **Cálculo en el software excel**

En la tabla 6 se reflejan los datos iniciales y finales de la probeta que se ha utilizado en el laboratorio virtual. En la tabla 7 se tabulan los valores que ha aplicado

la máquina a la probeta.

**Tabla 6.**

*Valores iniciales y finales de la probeta de acero dulce utilizada.*

<i>Do (mm)</i>	11,5	<i>Df (mm)</i>	7,79
<i>Ao (mm<sup>2</sup>)</i>	103,87	<i>Af (mm<sup>2</sup>)</i>	47,661
<i>Lo (mm)</i>	192	<i>Lf (mm)</i>	214,64
<i>L cal. (mm)</i>	59,24	<i>L cal f</i>	77,31

**Tabla 7.**

*Valores aplicados por el simulador a la probeta*

<b>FUERZA</b>	<b>ALARGAMIENTO</b>
<b>P(KN)</b>	<b><math>\Delta l</math>(mm)</b>
0	0
2	0
4	0,2
6	0,5
8	1
10	1
12	1
14	1,5
16	2
18	2
20	2,2
22	3
24	3
26	3,5
28	4
30	4
32	4
34	4,5
36	5
37	6
36	7
35	9
37	10
40	12
42	13,5
44	17
46	19,5
48	25
50	31
52	37
54	42

FUERZA	ALARGAMIENTO
56	47
57	52
52	60
51	62
50	63

*Nota.* La tabla tiene los valores de carga y alargamiento a los que ha sido sometida la probeta.

A partir de estos datos se calcula el esfuerzo y la deformación a la que está sometida la probeta utilizada tal como lo muestra la tabla 8.

**Tabla 8.**

*Valores de esfuerzo, deformación y el área bajo la curva a lo largo del ensayo realizado*

Deformación e(mm/mm)	Esfuerzo (KN/mm <sup>2</sup> )	Área bajo la curva
0,0000	0,0000	0,0000
0,0001	6,6368	0,0004
0,0005	13,2737	0,0037
0,0008	19,9105	0,0053
0,0011	26,5474	0,0075
0,0014	33,1842	0,0080
0,0017	39,8211	0,0117
0,0019	46,4579	0,0092
0,0023	53,0948	0,0186
0,0026	59,7316	0,0151
0,0029	66,3685	0,0202
0,0033	73,0053	0,0261
0,0036	79,6422	0,0245
0,0039	86,2790	0,0222
0,0043	92,9159	0,0383
0,0046	99,5527	0,0309
0,0050	106,1896	0,0440
0,0054	112,8264	0,0410
0,0058	119,4633	0,0497
0,0063	126,1001	0,0525
0,0067	132,7370	0,0554
0,0073	139,3738	0,0800
0,0078	146,0107	0,0687
0,0083	152,6475	0,0878
0,0089	159,2844	0,0917
0,0096	165,9212	0,1130
0,0103	172,5581	0,1086
0,0110	179,1949	0,1223

Deformación e(mm/mm)	Esfuerzo	
	(KN/mm <sup>2</sup> )	Área bajo la curva
0,0120	185,8318	0,1952
0,0136	192,4686	0,3034
0,0139	199,1055	0,0523

Luego de haber obtenido estos valores se calculan las propiedades mecánicas en base a la teoría vista en el capítulo II, los resultados se muestran en la tabla 9.

**Tabla 9.**

*Resultado de las diferentes propiedades mecánicas calculadas mediante el software excel*

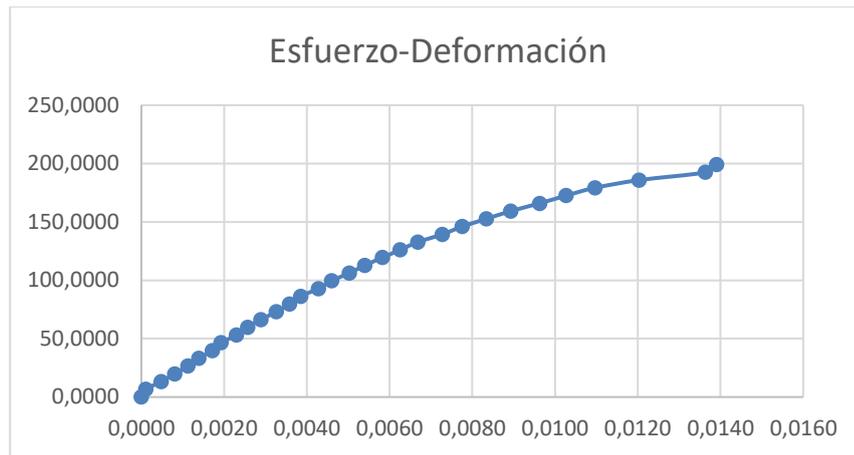
Modulo elástico	20,1545	GPA
Punto de prueba	165,9212	(N/mm <sup>2</sup> )
Resistencia a la tracción	199,1055	(N/mm <sup>2</sup> )
Punto de rotura	199,1055	(KN/mm <sup>2</sup> )
Módulo secante	17,73	GPa
Módulo tangente	9,547	GPa

*Nota.* En esta tabla se comprueban los resultados que da el laboratorio virtual.

Para la verificación del resultado del software excel se grafica los datos de esfuerzo – deformación (figura 49), carga – alargamiento (figura 50) y se debe obtener una curva idéntica a la que da el laboratorio virtual.

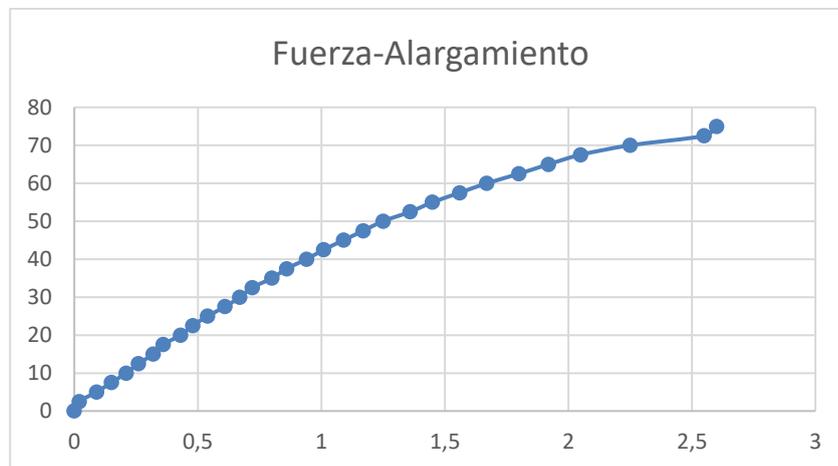
**Figura 49**

*Gráfica obtenida en el software excel*



**Figura 50**

*Gráfica de carga vs alargamiento obtenida en el software excel*



*Nota.* La figura muestra la deformación que tuvo la probeta en función de las cargas, la cual es mínima y despreciable, por lo que se confirma la característica de un material frágil como el hierro fundido.

### 3.2 Procedimiento para el ensayo de compresión

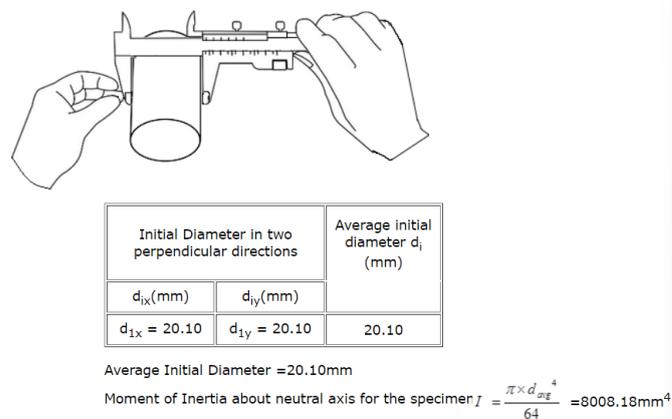
#### 3.2.1 Acero dulce

##### Primer paso

Medir el diámetro de la probeta dos veces de manera perpendicular como lo describe la figura 51, respectivamente, y calcular el momento de inercia de la probeta.

#### Figura 51

*Medición del diámetro y cálculo del momento de inercia.*



*Nota.* El cálculo del momento de inercia se calcula con la siguiente fórmula:  $I = \frac{\pi \times d_a^4}{64}$ .

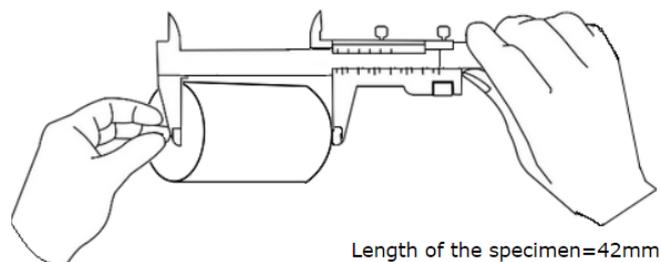
Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Compressive Test on Mild Steel, Virtual Labs.

##### Segundo paso

Medir la longitud inicial de la probeta como lo muestra la figura 52.

#### Figura 52

*Medición de la longitud de la probeta.*



*Nota.* Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Compressive Test on Mild Steel,

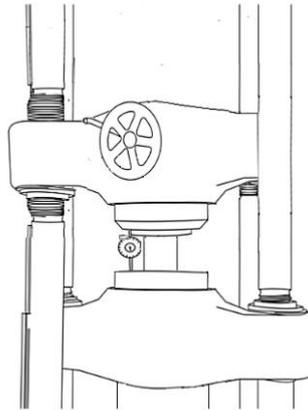
Virtual Labs.

### Tercer paso

Colocar la probeta en la máquina de ensayos universal como lo muestra la figura 53.

### Figura 53

*Colocación de la probeta en la máquina de ensayos.*



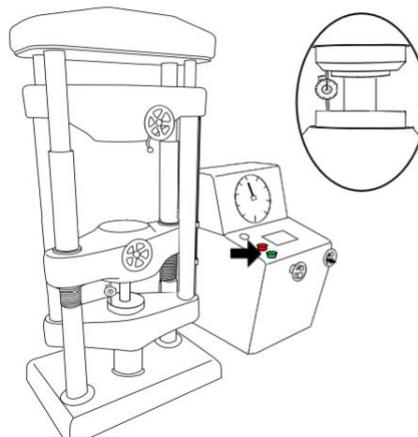
*Nota.* Figura tomada de (NITK Surathkal, 2021)

### Cuarto paso

Accionar el simulador para aplicar la carga en la probeta como lo muestra la figura 54.

### Figura 54

*Ajuste y aplicación de la fuerza a la probeta de estudio.*



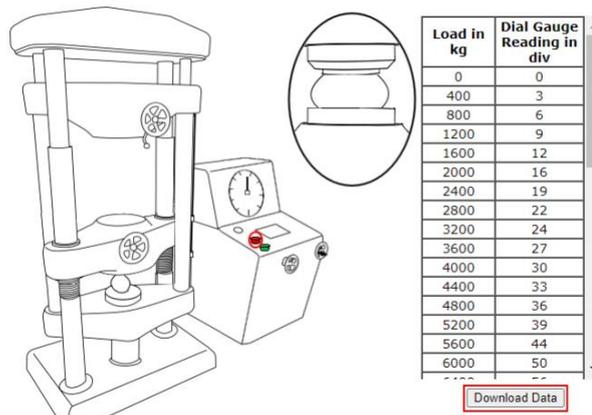
*Nota.* Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Compressive Test on Mild Steel, Virtual Labs.

### Quinto Paso

Obtener los datos dados por la máquina para el proceso respectivo como lo muestra la figura 55.

### Figura 55

*Obtención de datos dados por la máquina.*



*Nota.* Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Compressive Test on Mild Steel, Virtual Labs.

La tabla 10. Muestra la carga aplicada a la probeta, el valor de lectura del comparador de carátula y el acortamiento producido en milímetros.

### Tabla 10.

*Tabla de carga aplicada*

<i>Lectura comparador</i>	<i>Fuerza</i>	<i>Acortamiento</i>
	P(KN)	$\Delta l$ (mm)
0	0	0
3	400	0,03
5	800	0,05
7	1200	0,07
10	1600	0,1
12	2000	0,12
15	2400	0,15
18	2800	0,18
21	3200	0,21
24	3600	0,24
27	4000	0,27
30	4400	0,3
33	4800	0,33
37	5200	0,37

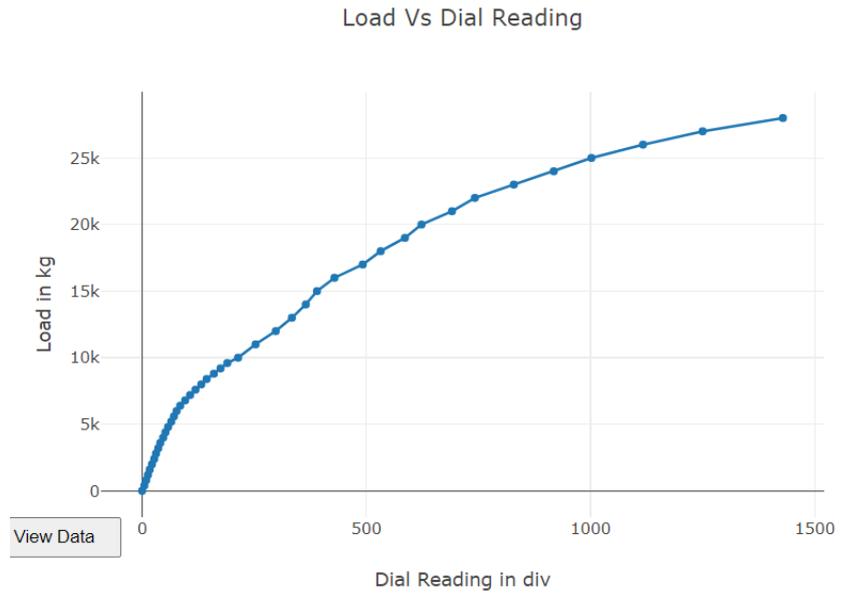
<i>Lectura comparador</i>	Fuerza	Acortamiento
44	5600	0,44
51	6000	0,51
59	6400	0,59
68	6800	0,68
81	7200	0,81
95	7600	0,95
110	8000	1,1
126	8400	1,26
141	8800	1,41
153	9200	1,53
172	9600	1,72
183	10000	1,83
222	11000	2,22
249	12000	2,49
282	13000	2,82
316	14000	3,16
361	15000	3,61
398	16000	3,98
445	17000	4,45
520	18000	5,2
590	19000	5,9
665	20000	6,65
764	21000	7,64
834	22000	8,34
934	23000	9,34
1040	24000	10,4
1144	25000	11,44
1251	26000	12,51
1370	27000	13,7
1429	28000	14,29

### **Sexto paso**

Obtención de las gráficas que da como resultado el simulador, en las figuras 56 y 57. En la figura 58 se tiene los resultados que da el laboratorio virtual.

### **Figura 56**

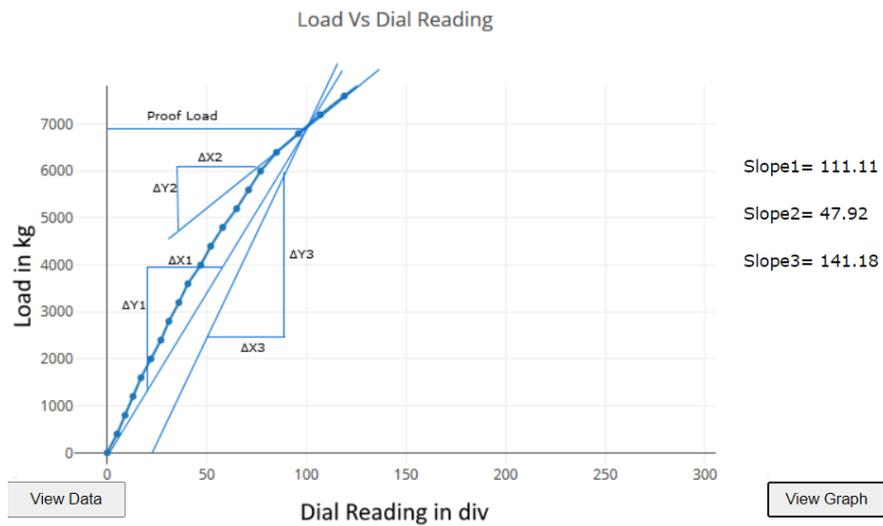
*Carga vs lectura del comprobador de carátula*



Nota Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Compressive Test on Mild Steel, Virtual Labs.

**Figura 57**

*Pendiente de la curva*



Nota. Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Compressive Test on Mild Steel, Virtual Labs.

**Figura 58**

*Resultados dados por el laboratorio virtual*

Result	Actual Value
Proof Stress(N/mm <sup>2</sup> )	213.43
Compressive Strength(N/mm <sup>2</sup> )	866.09
Secant Modulus(GPa)	18.26
Tangent Modulus(GPa)	8.91
Modulus of Elasticity(GPa)	20.14

Nota. Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Compressive Test on Mild Steel, Virtual Labs.

- **Cálculo en el software excel**

En la tabla 11 se reflejan los datos iniciales y finales de la probeta que se ha utilizado en el laboratorio virtual.

**Tabla 11.**

*Valores iniciales y finales de la probeta de acero dulce utilizada.*

<b>Do (mm)</b>	20,1	
<b>Ao (mm<sup>2</sup>)</b>	317,31	
<b>I (mm<sup>4</sup>)</b>	8012,24	
<b>Lo (mm)</b>	42	<b>Lf (mm)</b> 27,81

A partir de los datos de la tabla 10 se calcula el esfuerzo y la deformación a la que está sometida la probeta utilizada tal como lo muestra la tabla 12.

**Tabla 12.**

*Valores de esfuerzo, deformación y el área bajo la curva a lo largo del ensayo realizado*

Deformación	Esfuerzo	Área bajo la curva
0	0,000	0
0,0012	12,36651	0,00
0,0021	24,73301	0,02
0,0031	37,09952	0,03
0,0040	49,46602	0,04
0,0052	61,83253	0,07
0,0064	74,19903	0,08
0,0074	86,56554	0,08

Deformación	Esfuerzo	Área bajo la curva
0,0086	98,93205	0,11
0,0096	111,29855	0,11
0,0112	123,66506	0,18
0,0124	136,03156	0,15
0,0138	148,39807	0,20
0,0155	160,76457	0,26
0,0169	173,13108	0,24
0,0183	185,49759	0,26
0,0202	197,86409	0,37
0,0229	210,23060	0,53
0,0255	222,59710	0,57
0,0283	234,96361	0,65
0,0314	247,33011	0,75
0,0343	259,69662	0,72
0,0381	272,06313	1,01
0,0417	284,42963	0,99
0,0452	296,79614	1,04
0,0510	309,16264	1,73
0,0602	340,07891	3,01
0,0710	370,99517	3,81
0,0795	401,91144	3,31
0,0869	432,82770	3,08
0,0929	463,74396	2,67
0,1021	494,66023	4,45
0,1171	525,57649	7,65
0,1267	556,49276	5,15
0,1395	587,40902	7,35
0,1483	618,32529	5,31
0,1645	649,24155	10,26
0,1767	680,15781	8,07
0,1974	711,07408	14,41
0,2186	741,99034	15,40
0,2386	772,90661	15,15
0,2660	803,82287	21,59
0,2976	834,73914	25,94
0,3402	865,65540	36,23

Luego de haber obtenido estos valores se calculan las propiedades mecánicas en base a la teoría vista en el capítulo II, los resultados se muestran en la tabla 13.

**Tabla 13.**

*Resultado de las diferentes propiedades mecánicas calculadas mediante el software*

excel

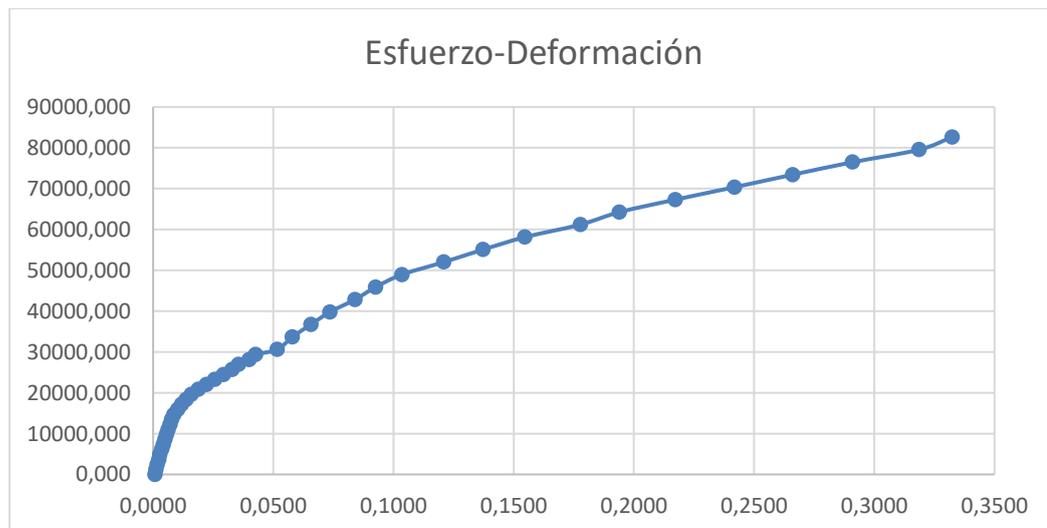
<b>Modulo elástico</b>	18,69	GPa
<b>Esfuerzo de prueba</b>	259,70	(N/mm <sup>2</sup> )
<b>Resistencia a la compresión</b>	865,66	(N/mm <sup>2</sup> )
<b>Módulo secante</b>	14,71	GPa
<b>Módulo tangente</b>	6,61	GPa
<b>L/D</b>	2,09	
<b>% de acortamiento</b>	-33,79	%

*Nota.* En esta tabla se comprueban los resultados que da el laboratorio.

Para la verificación del resultado del software excel se grafica los datos de esfuerzo – deformación (figura 59), carga – alargamiento (figura 60) y se debe obtener una curva idéntica a la que da el laboratorio virtual.

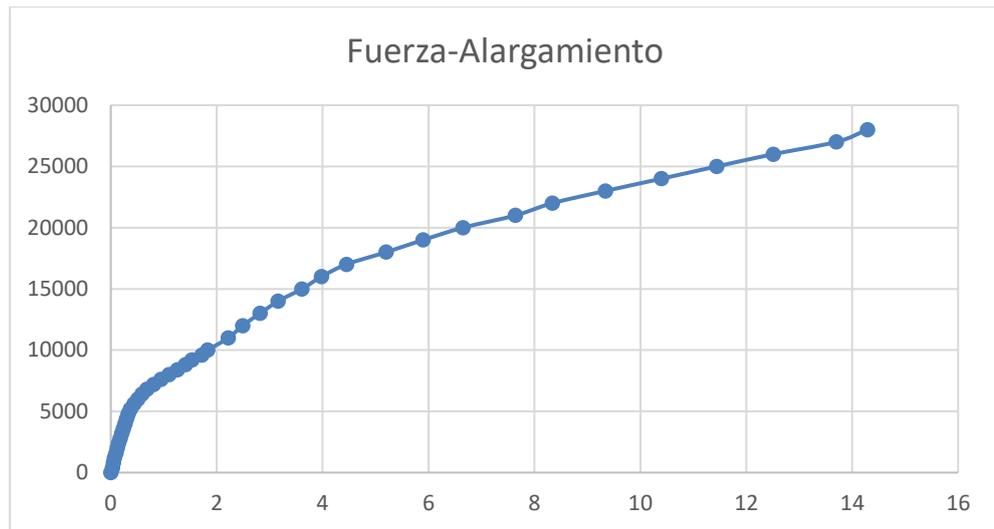
### Figura 59

*Gráfica obtenida en el software excel*



### Figura 60

*Gráfica de carga vs alargamiento obtenida en el software excel*



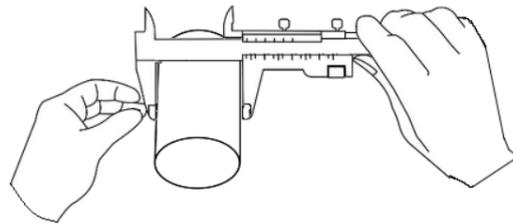
### 3.2.2 Hierro Fundido

#### Primer paso

Medir el diámetro de la probeta dos veces de manera perpendicular como lo describe la figura 61, respectivamente, y calcular el momento de inercia de la probeta.

#### Figura 61

*Medición del diámetro y cálculo del momento de inercia.*



Initial Diameter in two perpendicular directions		Average initial diameter $d_i$ (mm)
$d_{ix}$ (mm)	$d_{iy}$ (mm)	
$d_{1x} = 20.00$	$d_{1y} = 20.00$	20.00

Average Initial Diameter = 20.00mm

Moment of Inertia about neutral axis for the specimen  $I = \frac{\pi \times d_{avg}^4}{64} = 7850.00 \text{mm}^4$

*Nota.* El cálculo del momento de inercia se calcula con la siguiente fórmula:  $I = \frac{\pi \times d_a^4}{64}$ .

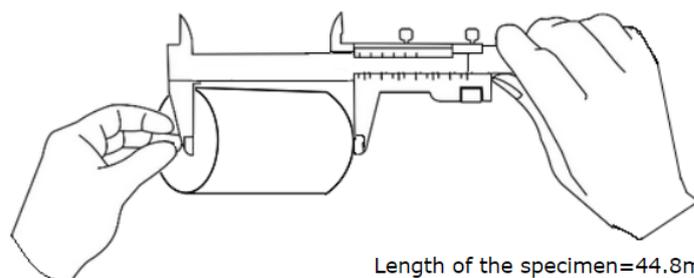
Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Compressive Test on Cast Iron, Virtual Labs.

#### Segundo paso

Medir la longitud inicial de la probeta como lo muestra la figura 62.

#### Figura 62

*Medición de la longitud de la probeta.*



Length of the specimen = 44.8mm

*Nota.* Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Compressive Test on Cast Iron,

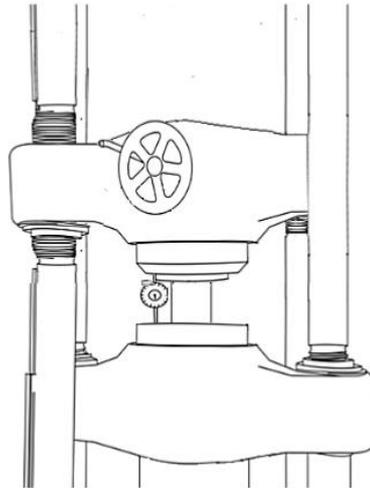
Virtual Labs.

### **Tercer paso**

Colocar la probeta en la máquina de ensayos universal como lo muestra la figura 63.

### **Figura 63**

*Colocación de la probeta en la máquina de ensayos.*



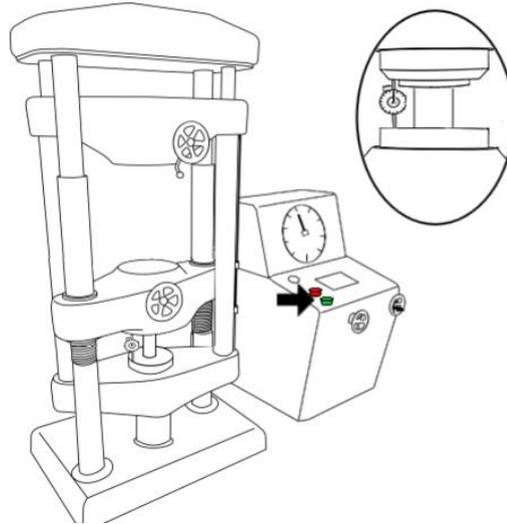
*Nota.* Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Compressive Test on Cast Iron, Virtual Labs.

### **Cuarto paso**

Accionar el simulador para aplicar la carga en la probeta como lo muestra la figura 64.

### **Figura 64**

*Ajuste y aplicación de la fuerza a la probeta de estudio.*



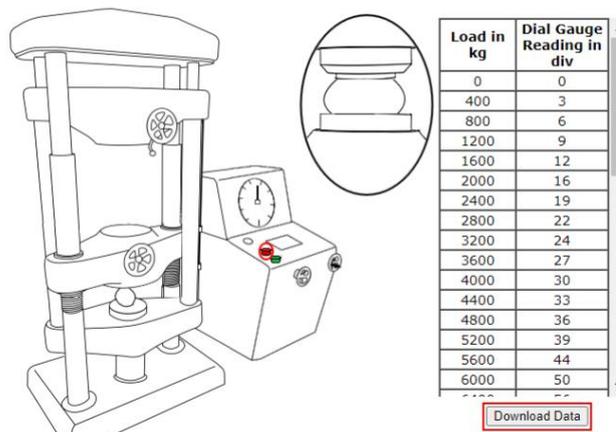
*Nota.* Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Compressive Test on Cast Iron, Virtual Labs.

### Quinto Paso

Obtener los datos dados por la máquina para el proceso respectivo como lo muestra la figura 65.

### Figura 65

*Obtención de datos dados por la máquina.*



*Nota.* Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Compressive Test on Cast Iron, Virtual Labs.

### Tabla de carga aplicada

La tabla 14. Muestra la carga aplicada a la probeta, el valor de lectura del comparador de carátula y el acortamiento producido en milímetros.

**Tabla 14.***Tabla de carga aplicada*

Lectura comparador	Acortamiento	
	Fuerza P(KN)	$\Delta l$ (mm)
0	0	0
5	5	0,05
9	10	0,09
13	15	0,13
17	20	0,17
21	25	0,21
25	30	0,25
29	35	0,29
33	40	0,33
38	45	0,38
42	50	0,42
46	55	0,46
50	60	0,5
54	65	0,54
57	70	0,57
61	75	0,61
65	80	0,65
70	85	0,7
74	90	0,74
78	95	0,78
82	100	0,82
86	105	0,86
91	110	0,91
96	115	0,96
101	120	1,01
109	125	1,09
119	130	1,19
126	135	1,26
141	140	1,41
150	145	1,5
160	150	1,6
172	155	1,72
187	160	1,87
196	165	1,96
205	170	2,05
215	175	2,15
229	180	2,29
248	185	2,48
264	190	2,64
284	195	2,84
296	200	2,96

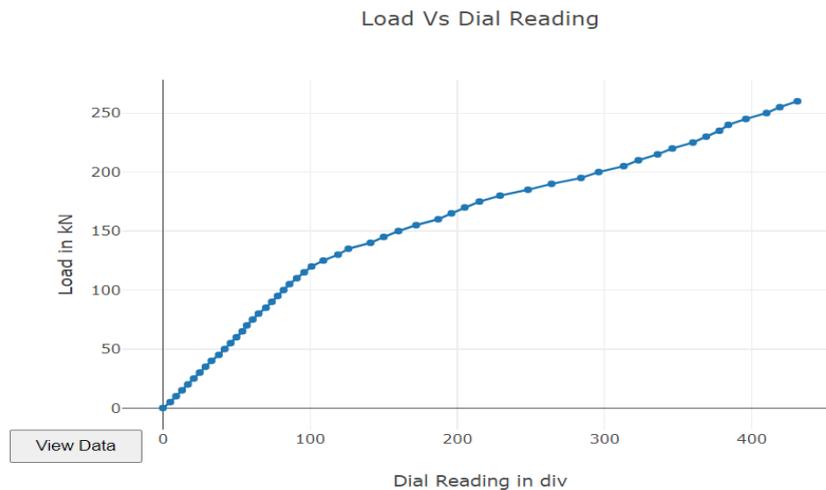
Lectura comparador	Fuerza	Acortamiento
313	205	3,13
323	210	3,23
336	215	3,36
346	220	3,46
360	225	3,6
369	230	3,69
378	235	3,78
384	240	3,84
396	245	3,96
410	250	4,1
419	255	4,19
431	260	4,31

### Sexto paso

Obtención de las gráficas que da como resultado el simulador, en las figuras 66 y 67. En la figura 68 se muestran los resultados dados por el laboratorio virtual.

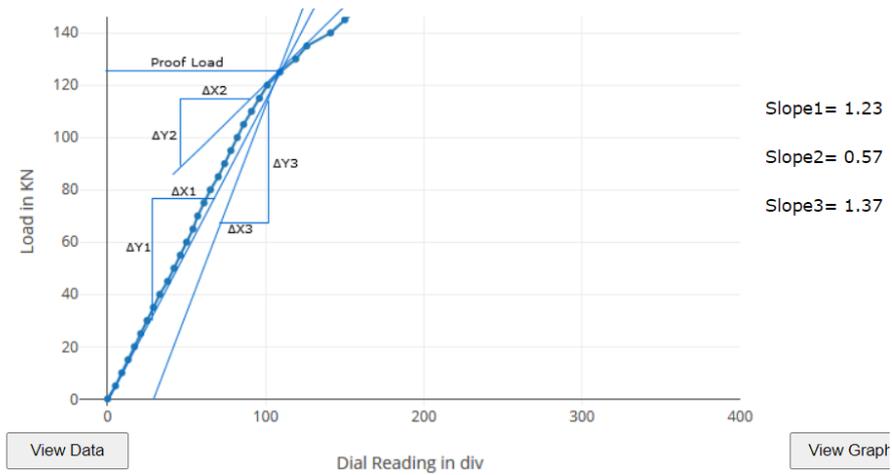
### Figura 66

*Carga vs lectura del comprobador de carátula*



### Figura 67

*Pendiente de la curva*



**Figura 68**

*Resultados dados por el laboratorio virtual*

Result	Actual Value
Proof Stress(N/mm <sup>2</sup> )	382.17
Compressive Strength(N/mm <sup>2</sup> )	828.03
Secant Modulus(GPa)	16.52
Tangent Modulus(GPa)	6.85
Modulus of Elasticity(GPa)	19.29

*Nota.* Figura tomada de The Virtual Lab (2020), Compressive Test on Cast Iron, Virtual Labs.

- **Cálculo en el software excel**

En la tabla 15 se reflejan los datos iniciales y finales de la probeta que se ha utilizado en el laboratorio virtual.

**Tabla 15.**

*Valores iniciales y finales de la probeta de acero dulce utilizada.*

<i>Do (mm)</i>	20	<i>Df (mm)</i>	20
<i>Ao (mm<sup>2</sup>)</i>	314,16	<i>Lf (mm)</i>	40,49
<i>I (mm<sup>4</sup>)</i>	7853,98	<i>L/D</i>	2,24
<i>Lo (mm)</i>	44,8		
<i>L cal. (mm)</i>	44,8		

A partir de los datos de las tablas 14 se calcula el esfuerzo y la deformación a la que está sometida la probeta utilizada tal como lo muestra la tabla 16.

**Tabla 16.**

*Valores de esfuerzo, deformación y el área bajo la curva a lo largo del ensayo realizado*

Deformación e (mm/mm)	Esfuerzo (N/mm <sup>2</sup> )	Área bajo la curva
0,0000	0,00	0
0,0011	15,9155	0,0000
0,0020	31,8310	0,0213
0,0029	47,7465	0,0355
0,0038	63,6620	0,0497
0,0047	79,5775	0,0639
0,0056	95,4930	0,0782
0,0065	111,4085	0,0924
0,0074	127,3240	0,1066
0,0085	143,2394	0,1510
0,0094	159,1549	0,1350
0,0103	175,0704	0,1492
0,0112	190,9859	0,1634
0,0121	206,9014	0,1776
0,0127	222,8169	0,1439
0,0136	238,7324	0,2060
0,0145	254,6479	0,2203
0,0156	270,5634	0,2931
0,0165	286,4789	0,2487
0,0174	302,3944	0,2629
0,0183	318,3099	0,2771
0,0192	334,2254	0,2913
0,0203	350,1409	0,3819
0,0214	366,0564	0,3997
0,0225	381,9719	0,4174
0,0243	397,8874	0,6963
0,0266	413,8029	0,9059
0,0281	429,7183	0,6590
0,0315	445,6338	1,4654
0,0335	461,5493	0,9112
0,0357	477,4648	1,0480
0,0384	493,3803	1,3002
0,0417	509,2958	1,6786
0,0438	525,2113	1,0391
0,0458	541,1268	1,0711
0,0480	557,0423	1,2256
0,0511	572,9578	1,7656

Deformación e (mm/mm)	Esfuerzo (N/mm <sup>2</sup> )	Área bajo la curva
0,0554	588,8733	2,4637
0,0589	604,7888	2,1315
0,0634	620,7043	2,7355
0,0661	636,6198	1,6839
0,0699	652,5353	2,4459
0,0721	668,4508	1,4743
0,0750	684,3663	1,9628
0,0772	700,2817	1,5454
0,0804	716,1972	2,2132
0,0824	732,1127	1,4548
0,0844	748,0282	1,4867
0,0857	763,9437	1,0125
0,0884	779,8592	2,0676
0,0915	795,7747	2,4619
0,0935	811,6902	1,6146
0,0962	827,6057	2,1955

Luego de haber obtenido estos valores se calculan las propiedades

mecánicas en base a la teoría vista en el capítulo II, los resultados se muestran en la tabla 17.

**Tabla 17**

*Resultado de las diferentes propiedades mecánicas calculadas mediante el software excel*

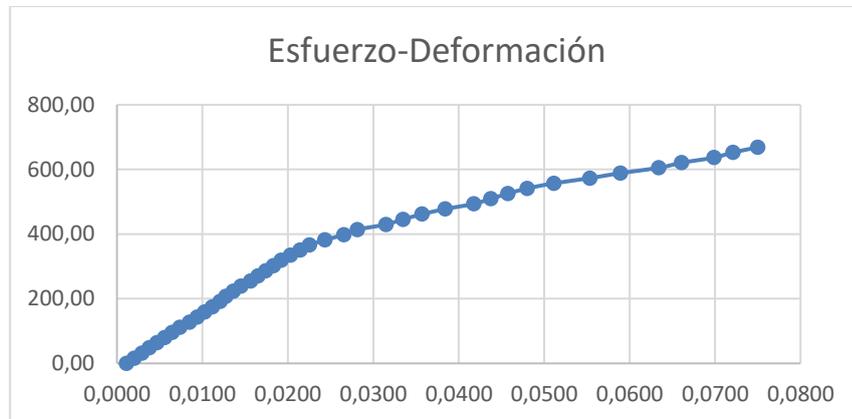
<i>Modulo elástico</i>	<i>17,32</i>	<i>GPa</i>
<i>Punto de fluencia</i>	<i>381,97</i>	<i>(N/mm<sup>2</sup>)</i>
<i>Resistencia a la compresión</i>	<i>827,61</i>	<i>(N/mm<sup>2</sup>)</i>
<i>Punto de rotura</i>	<i>827,61</i>	<i>(N/mm<sup>2</sup>)</i>
<i>Módulo secante</i>	<i>16,98</i>	<i>GPa</i>
<i>Módulo tangente</i>	<i>8,913</i>	<i>GPa</i>
<i>% de compresión</i>	<i>9,62</i>	<i>%</i>

*Nota.* En esta tabla se comprueban los resultados que da el laboratorio.

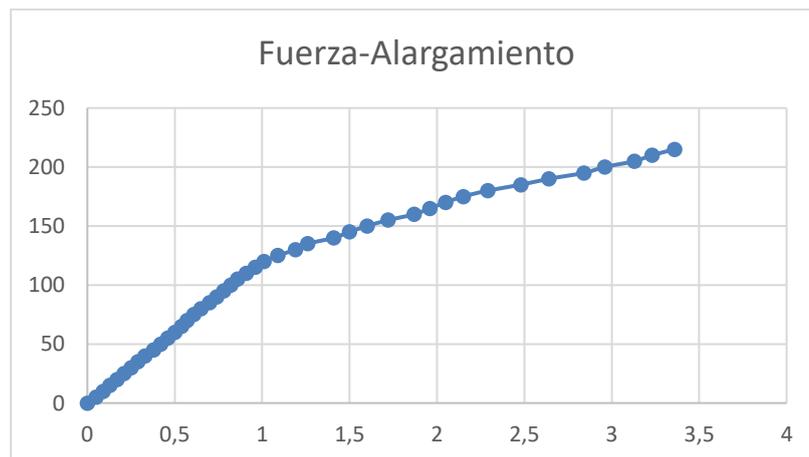
Para la verificación del resultado del software excel se grafica los datos de esfuerzo – deformación (figura 69), carga – alargamiento (figura 70) y se debe obtener una curva idéntica a la que da el laboratorio virtual.

**Figura 69**

*Gráfica obtenida en el software excel*

**Figura 70**

*Gráfica de carga vs alargamiento obtenida en el software excel*



### 3.3 Software CAD

#### 3.3.1 Ensayo de tensión de acero dulce

En el software inventor se hará el dibujo de la probeta que tendrá las dimensiones antes mencionadas y la fuerza aplicada en el laboratorio virtual.

En la tabla 18 se observan las dimensiones y la fuerza requeridas en esta probeta.

**Tabla 18.**

*Dimensiones y fuerza requerida para la simulación en software CAD*

Do (mm)	11,5
Ao (mm <sup>2</sup> )	103,87
Lo (mm)	192

Seleccionar el material adecuado, es un punto clave para que los resultados sean lo más aproximados posibles, de esta manera se comprobará la simulación del laboratorio virtual, para la simulación dinámica explícita se creará el material requerido en base a la figura 71.

### Figura 71

#### Características usadas del acero dulce A36

ACERO DULCE A36	
LA-4167-MS. May 1 1969. Selected Hugoniot: EOS 7th Int. Symp. Ballistics. Johnson + Cook	
Density	7,85e-06 kg/mm <sup>3</sup>
Structural	
▼ Isotropic Elasticity	
Derive from	Young's Modulus and Poisson's Ratio
Young's Modulus	2,09e+05 MPa
Poisson's Ratio	0,27000
Bulk Modulus	1,5145e+05 MPa
Shear Modulus	82283 MPa
Thermal	
Specific Heat Constant Pressure	4,52e+05 mJ/kg·°C
Other	
▼ Johnson Cook Strength	
Strain Rate Correction	First-Order
Initial Yield Stress	356,30 MPa
Hardening Constant	233,00 MPa
Hardening Exponent	0,36000

Con el material elegido se procede a crear el mallado de la figura de la probeta como en la figura 72, luego se aplican las restricciones y desplazamientos requeridos como lo muestra la figura 73.

### Figura 72

#### Mallado de la probeta

Model (A4) > Mesh > Mesh Controls	
Object Name	Body Sizing
State	Fully Defined
Scope	
Scoping Method	Geometry Selection
Geometry	1 Body
Definition	
Suppressed	No
Type	Element Size
Element Size	2, mm
Advanced	
Defeature Size	Default
Behavior	Soft

## Figura 73

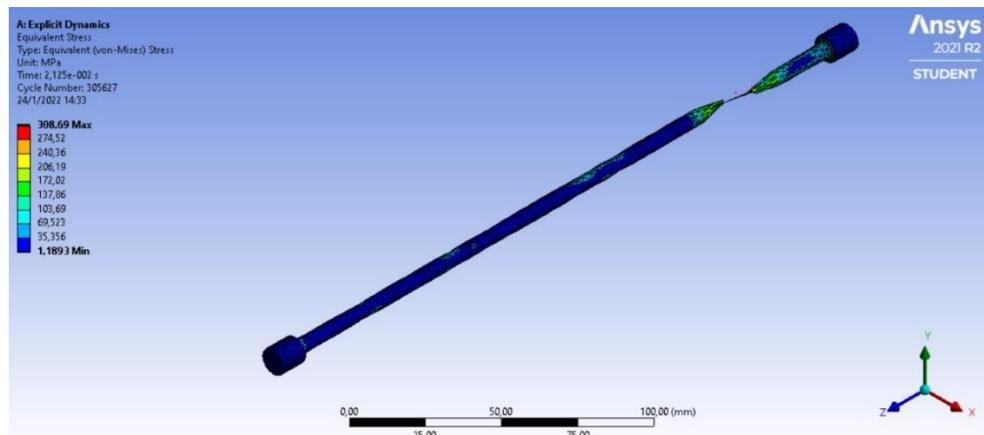
### Restricción y desplazamiento

Model (A4) > Explicit Dynamics (A5) > Loads			
Object Name	Fixed Support	Displacement	Force
State	Fully Defined		Suppressed
Scope			
Scoping Method	Geometry Selection		
Geometry	1 Face		
Definition			
Type	Fixed Support	Displacement	Force
Suppressed		No	Yes
Define By		Components	
Coordinate System	Global Coordinate System		
X Component		Free	0, N (step applied)
Y Component		Free	0, N (step applied)
Z Component		-63, mm (ramped)	-50000 N (step applied)

Para los resultados se selecciona el esfuerzo equivalente y la deformación plástica equivalente como lo muestran la figura 74 y 75 respectivamente. Y con estos dos parámetros se realiza la gráfica de la figura 76.

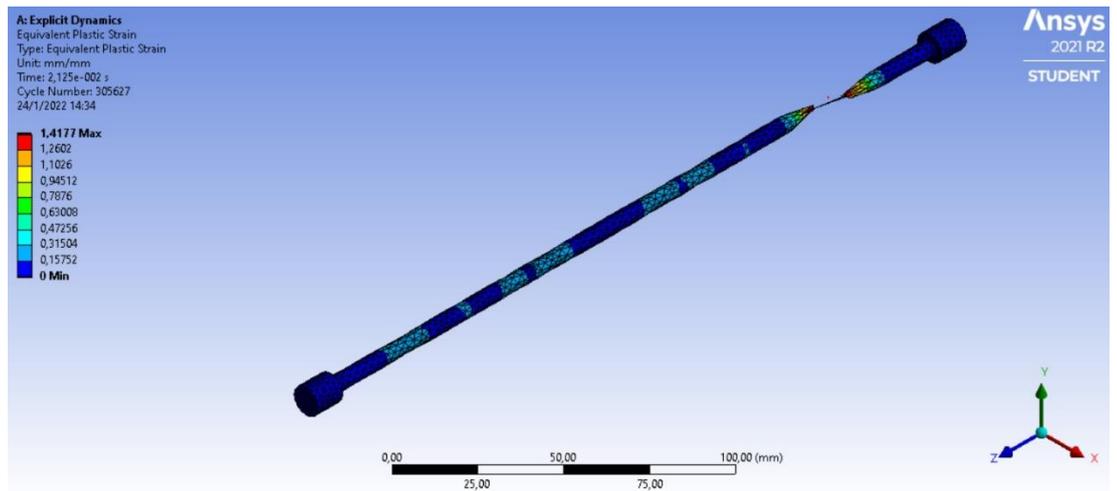
## Figura 74

### Esfuerzo equivalente



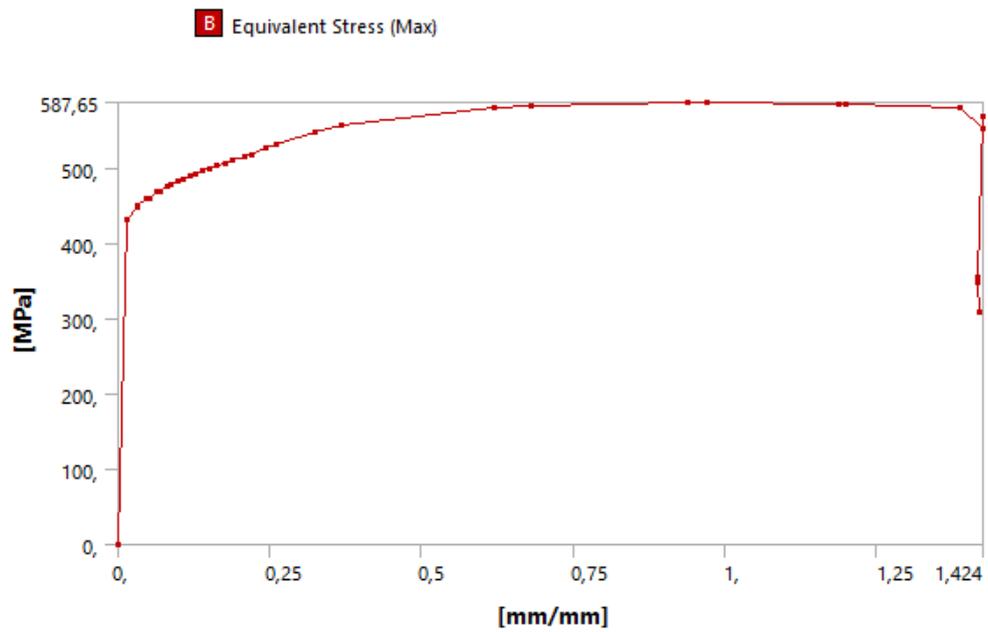
## Figura 75

### Deformación plástica equivalente



**Figura 76**

*Curva esfuerzo deformación obtenida*



La curva mostrada tendrá como valores los siguientes datos de la tabla 19

**Tabla 19**

*Valores para la generación de la curva esfuerzo deformación*

<i>[B] Equivalent Stress (Max) [MPa]</i>	<i>Equivalent Plastic Strain (Max) [mm/mm]</i>
0,	0,
431,76	1,4655e-002
433,06	1,5689e-002
447,97	3,1143e-002
449,55	3,3204e-002
459,16	4,7688e-002
460,97	5,0814e-002

[B] Equivalent Stress (Max) [MPa]	Equivalent Plastic Strain (Max) [mm/mm]
468,14	6,4496e-002
470,18	6,8761e-002
475,93	8,1767e-002
478,2	8,7295e-002
483,04	9,9748e-002
485,6	0,10674
489,81	0,11878
492,74	0,12756
496,53	0,13936
499,95	0,15044
503,45	0,1622
507,52	0,17642
510,8	0,18837
515,7	0,20708
518,75	0,21941
527,	0,24452
531,74	0,25944
548,95	0,32558
558,06	0,36704
580,5	0,61955
582,93	0,6809
587,55	0,9372
587,65	0,96974
586,39	1,1865
586,21	1,1995
581,46	1,3868
552,65	1,4233
568,92	1,424
354,86	1,4143
347,42	
350,91	
308,69	1,4177

Para el análisis de resultados se comparan los valores obtenidos con los valores del material original cuyas características se presentan en la figura 77.

### Figura 77

*Propiedades del acero A36*

Summary	
Name	Mild Steel
Phase at STP	solid
Density	7850 kg/m <sup>3</sup>
Ultimate Tensile Strength	400-550 MPa
Yield Strength	250 MPa
Young's Modulus of Elasticity	200 GPa
Brinell Hardness	120 BHN
Melting Point	1450 °C
Thermal Conductivity	50 W/mK
Heat Capacity	510 J/g K
Price	0.5 \$/kg

*Nora:* Figura tomada de Material properties. (s. f.). Propiedades del acero dulce [Figura]. Acero Dulce.

### 3.3.2 Ensayo de tensión del hierro fundido

En el software inventor se hará el dibujo de la probeta que tendrá las dimensiones que se mencionan en la tabla 20 y la fuerza aplicada en el laboratorio virtual.

**Tabla 20.**

*Dimensiones y fuerza requerida para la simulación en software CAD*

$A_0$	376,68
$(mm^2)$	
$L_0 (mm)$	187
$LC (mm)$	54,75

Seleccionar el material adecuado, es un punto clave para que los resultados sean lo más aproximados posibles, de esta manera se comprobará la simulación del laboratorio virtual, para la simulación dinámica explícita se creará el material requerido en base a la figura 78.

### Figura 78

*Características usadas del hierro fundido gris*

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	7150	kg m <sup>-3</sup>
<b>Isotropic Elasticity</b>		
Derive from	Young's Modulus and Pois...	
Young's Modulus	21,36	GPa
Poisson's Ratio	0,27	
Bulk Modulus	1,5478E+10	Pa
Shear Modulus	8,4094E+09	Pa
Specific Heat Constant Pressure, C <sub>p</sub>	452	J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
<b>Johnson Cook Strength</b>		
Strain Rate Correction	First-Order	
Initial Yield Stress	156,71	MPa
Hardening Constant	2,39E+08	Pa
Hardening Exponent	0,4	
Strain Rate Constant	0,055	
Thermal Softening Exponent	0,55	

Con el material elegido se procede a crear el mallado de la figura de la probeta como en la figura 79, luego se aplican las restricciones y desplazamientos requeridos como lo muestra la figura 80.

**Figura 79**

*Mallado de la probeta*

Defaults	
Physics Preference	Explicit
Element Order	Linear
Element Size	2, mm
Sizing	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	Default (4
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default
Transition	Slow
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Assembl
Bounding Box Diagonal	243,66 m
Average Surface Area	3340,8 m <sup>2</sup>
Minimum Edge Length	68,801 m

**Figura 80**

*Restricción y desplazamiento*

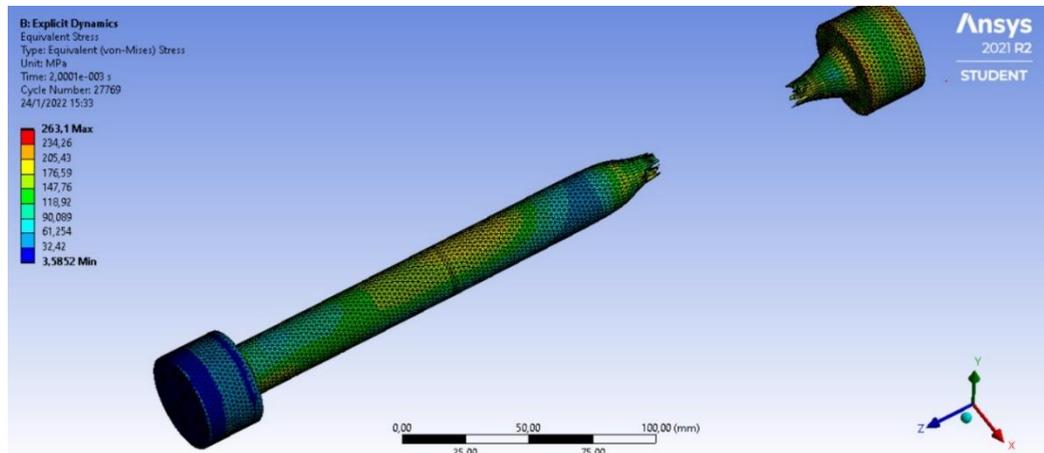
Model (B4) > Explicit Dynamics (B5) > Loads		
Object Name	Fixed Support	Displacement
State	Fully Defined	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	1 Face	
Definition		
Type	Fixed Support	Displacement
Suppressed	No	
Define By	Components	
Coordinate System	Global Coordinate System	
X Component	Free	
Y Component	Free	
Z Component	-100, mm (ramped)	

Para los resultados se selecciona el esfuerzo equivalente y la deformación

plástica equivalente como lo muestran la figura 81 y 82 respectivamente. Y con estos dos parámetros se realiza la gráfica de la figura 83.

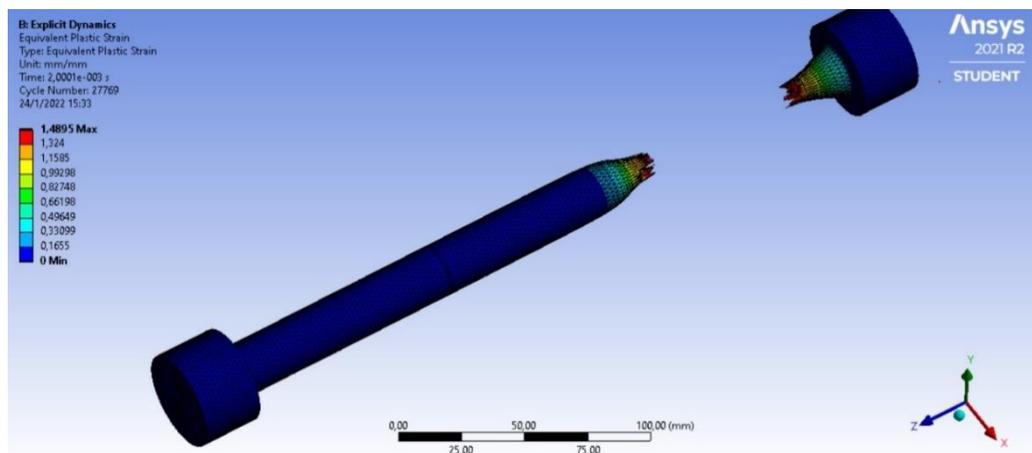
**Figura 81**

*Esfuerzo equivalente*



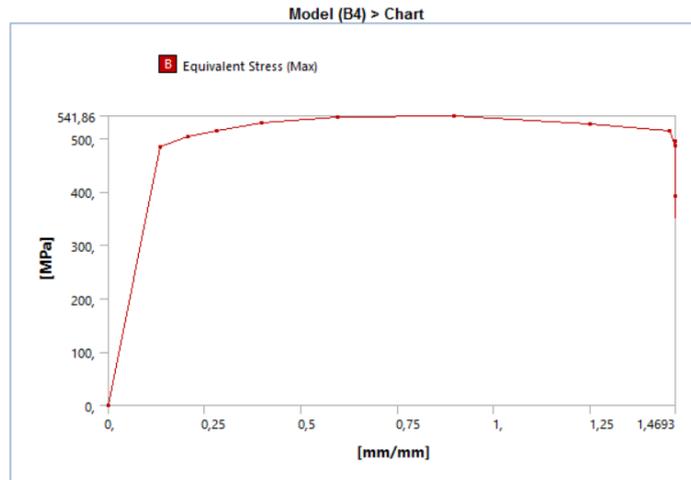
**Figura 82**

*Deformación plástica equivalente*



**Figura 83**

*Curva esfuerzo deformación obtenido*



La curva mostrada tendrá como valores los siguientes datos de la tabla 21.

**Tabla 21**

*Valores para la generación de la curva esfuerzo deformación*

<i>B] Equivalent Stress (Max) [MPa]</i>	<i>Equivalent Plastic Strain (Max) [mm/mm]</i>
0,	0,
483,11	0,13408
502,61	0,20579
513,79	0,28019
528,53	0,39755
540,14	0,59435
541,86	0,89585
526,9	1,2474
514,72	1,4534
487,15	1,4693
391,7	
494,04	1,4692
470,07	
433,68	
454,57	
429,93	
443,05	
444,35	
348,98	
438,25	
415,26	1,4692

Para el análisis de resultados se comparan los valores obtenidos con los valores del material original cuyas características se presentan en la figura 84.

**Figura 84**

*Propiedades del Hierro fundido Gris*

Resumen	
Nombre	Hierro gris
Fase en STP	sólido
Densidad	7150 kg / m <sup>3</sup>
Resistencia a la tracción	395 MPa
Límite de elasticidad	N / A
Módulo de Young	124 GPa
Dureza Brinell	235 BHN
Punto de fusión	1260 ° C
Conductividad térmica	53 W / mK
Capacidad calorífica	460 J / g K
Precio	1,2 \$ / kg

*Nota.* Figura tomada de Material Properties. (s. f.). Propiedades del hierro fundido [Figura]. Hierro Gris. <https://material-properties.org/es/hierro-gris-densidad-resistencia-dureza-punto-de-fusion/>

### 3.3.3 Ensayo de compresión del acero dulce

En el software inventor se hará el dibujo de la probeta que tendrá las dimensiones que se mencionan en la tabla 22 y la fuerza aplicada en el laboratorio virtual.

**Tabla 22.**

*Dimensiones para la simulación en software CAD*

$D_o$ (mm)	20,1
$A_o$ (mm <sup>2</sup> )	317,31
$I$ (mm <sup>4</sup> )	8012,24
$L_o$ (mm)	42

Seleccionar el material adecuado, es un punto clave para que los resultados sean lo más aproximados posibles, de esta manera se comprobará la simulación del laboratorio virtual, para la simulación dinámica explícita se creará el material requerido en base a la figura 85.

### Figura 85

*Características usadas del acero dulce A36*

	A	B	C
	Property	Value	Unit
2	Material Field Variables	Table	
3	Density	7,85	kg m <sup>-3</sup>
4	Isotropic Elasticity		
5	Derive from	Young's Modulus and Poisso...	
6	Young's Modulus	20,1	MPa
7	Poisson's Ratio	0,3	
8	Bulk Modulus	1,675E+07	Pa
9	Shear Modulus	7,7308E+06	Pa
10	Johnson Cook Strength		
11	Strain Rate Correction	First-Order	
12	Initial Yield Stress	213,43	MPa
13	Hardening Constant	2,29E+08	Pa
14	Hardening Exponent	0,6428	
15	Strain Rate Constant	0,0274	
16	Thermal Softening Exponent	1	
17	Melting Temperature	1535	C
18	Reference Strain Rate (/sec)	1	
19	Shock EOS-Linear		
20	Gruneisen Coefficient	2,17	
21	Parameter C1	3000	m s <sup>-1</sup>
22	Parameter S1	1,49	
23	Parameter Quadratic S2	0	s m <sup>-1</sup>
24	Principal Stress Failure		
25	Maximum Tensile Stress	4,7E+08	Pa
26	Maximum Shear Stress	8E+10	Pa

Con el material elegido se procede a crear el mallado de la figura de la probeta como en la figura 86, luego se aplican las restricciones y desplazamientos requeridos como lo muestra la figura 87.

**Figura 86**

*Mallado de la probeta*

Defaults	
Physics Preference	Explicit
Element Order	Linear
Element Size	2, mm
Sizing	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	Default (4
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default
Transition	Slow
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Assembl
Bounding Box Diagonal	243,66 m
Average Surface Area	3340,8 m
Minimum Edge Length	68,801 m

**Figura 87**

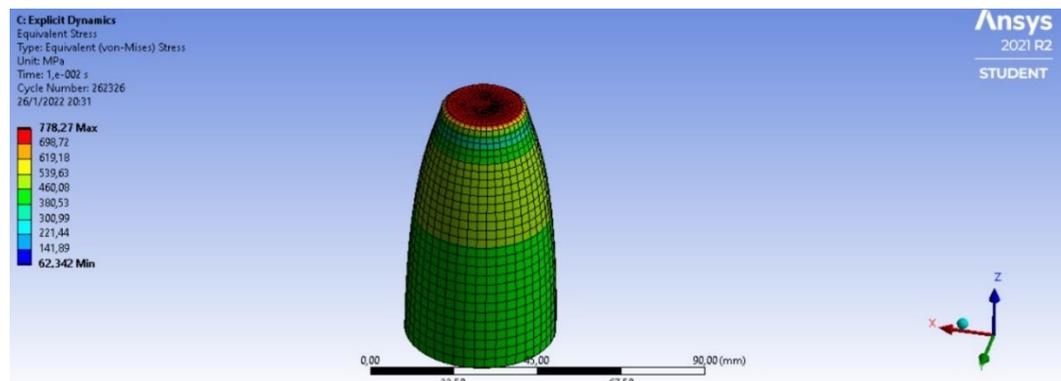
*Restricción y desplazamiento*

Model (B4) > Explicit Dynamics (B5) > Loads		
Object Name	Fixed Support	Displacement
State	Fully Defined	
Scope		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	1 Face	
Definition		
Type	Fixed Support	Displacement
Suppressed	No	
Define By	Components	
Coordinate System	Global Coordinate System	
X Component	Free	
Y Component	Free	
Z Component	-10, mm (ramped)	

Para los resultados se selecciona el esfuerzo equivalente y la deformación plástica equivalente como lo muestran la figura 88 y 89 respectivamente. Con estos dos parámetros se realiza la gráfica de la figura 90.

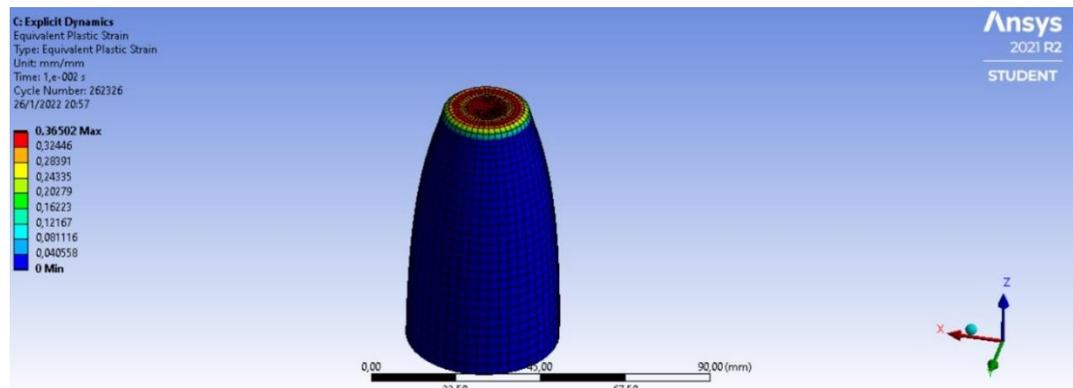
**Figura 88**

*Esfuerzo equivalente*



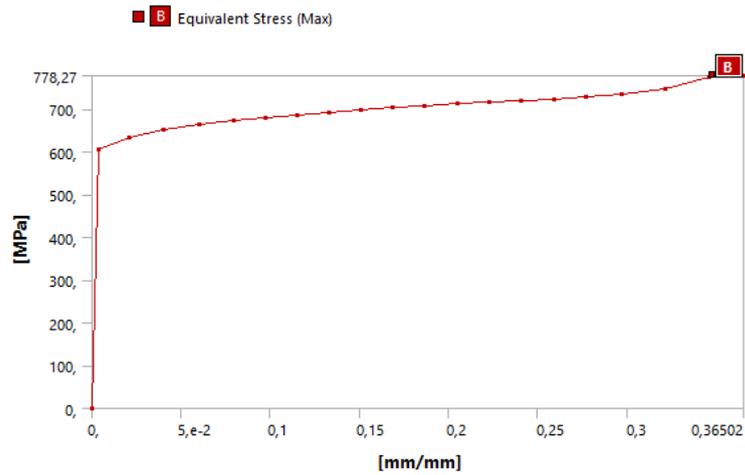
**Figura 89**

*Deformación plástica equivalente*



**Figura 90**

*Curva esfuerzo deformación obtenido*



La curva mostrada tendrá como valores los siguientes datos de la tabla 23.

**Tabla 23**

*Valores para la generación de la curva esfuerzo deformación*

<i>Equivalent Stress (Max) [MPa]</i>	<i>Equivalent Plastic Strain (Max) [mm/mm]</i>
0,	0,
605,22	3,8237e-003
634,85	2,0747e-002
652,99	4,0334e-002
664,86	6,0144e-002
673,28	7,9144e-002
680,39	9,7178e-002
686,88	0,11491
692,84	0,13253
698,42	0,15028
703,71	0,16826
708,49	0,18628
712,97	0,20443
717,12	0,22262
720,74	0,24074
724,08	0,25863
728,31	0,27664
734,07	0,29684
746,8	0,3215
775,38	0,3461
778,27	0,36502

Para el análisis de resultados se comparan los valores obtenidos con los valores del material original cuyas características se presentan en la figura 92.

**Figura 91**

*Propiedades estandarizadas del acero dulce A36*

Summary	
Name	Mild Steel
Phase at STP	solid
Density	7850 kg/m <sup>3</sup>
Ultimate Tensile Strength	400-550 MPa
Yield Strength	250 MPa
Young's Modulus of Elasticity	200 GPa
Brinell Hardness	120 BHN
Melting Point	1450 °C
Thermal Conductivity	50 W/mK
Heat Capacity	510 J/g K
Price	0.5 \$/kg

*Nora:* Figura tomada de Material properties. (s. f.). Propiedades del acero dulce [Figura]. Acero Dulce.

### 3.3.4 Ensayo de compresión del hierro fundido

En el software inventor se hará el dibujo de la probeta que tendrá las dimensiones que se mencionan en la tabla 24 y la fuerza aplicada en el laboratorio virtual.

**Tabla 24.**

*Dimensiones y fuerza requerida para la simulación en software CAD*

<i>Do (mm)</i>	20
<i>Ao (mm<sup>2</sup>)</i>	314,16
<i>M Inercia (mm<sup>4</sup>)</i>	7853,98
<i>Lo (mm)</i>	44,8
<i>Df (mm)</i>	20
<i>Lf (mm)</i>	40,49

Seleccionar el material adecuado, es un punto clave para que los resultados sean lo más aproximados posibles, de esta manera se comprobará la simulación del laboratorio virtual, para la simulación dinámica explícita se creará el material requerido en base a la figura 93.

### **Figura 92**

*Características usadas del hierro fundido gris*

Property	Value	Unit
Material Field Variables	Table	
Density	7150	kg m <sup>-3</sup>
<b>Isotropic Elasticity</b>		
Derive from	Young's Modulus and Poiss...	
Young's Modulus	19,9	GPa
Poisson's Ratio	0,26	
Bulk Modulus	1,3819E+10	Pa
Shear Modulus	7,8968E+09	Pa
Specific Heat Constant Pressure, C <sub>p</sub>	452	J kg <sup>-1</sup> C <sup>-1</sup>
<b>Johnson Cook Strength</b>		
Strain Rate Correction	First-Order	
Initial Yield Stress	315	MPa
Hardening Constant	3,39E+08	Pa
Hardening Exponent	0,4	
Strain Rate Constant	0,055	
Thermal Softening Exponent	0,55	
Melting Temperature	1537,9	C
Reference Strain Rate (/sec)	1	
Bulk Modulus	1E+11	Pa
Shear Modulus	6E+10	Pa

Con el material elegido se procede a crear el mallado de la figura de la probeta como en la figura 93, luego se aplican las restricciones y desplazamientos requeridos como lo muestra la figura 94.

**Figura 93**

*Mallado de la probeta*

Object Name	Mesh
State	Solved
<b>Display</b>	
Display Style	Use Geometry Setting
<b>Defaults</b>	
Physics Preference	Explicit
Element Order	Linear
Element Size	1,5 mm
<b>Sizing</b>	
Use Adaptive Sizing	Yes
Resolution	Default (4)
Mesh Defeaturing	Yes
Defeature Size	Default
Transition	Slow
Span Angle Center	Coarse
Initial Size Seed	Assembly
Bounding Box Diagonal	52,982 mm
Average Surface Area	1147, mm <sup>2</sup>
Minimum Edge Length	62,832 mm

**Figura 94**

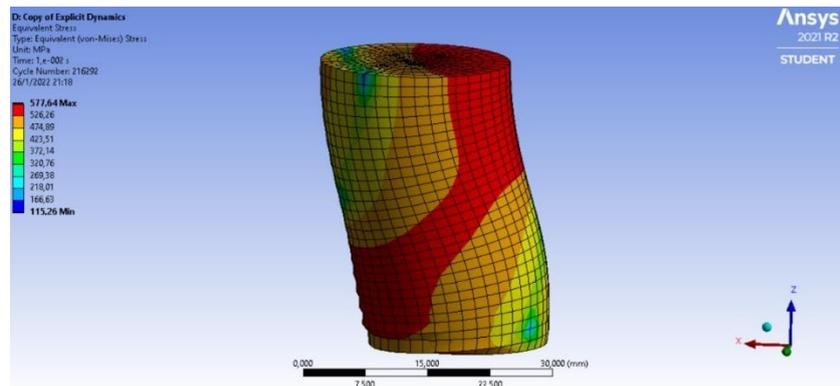
*Restricción y desplazamiento*

Object Name	Fixed Support	Displacement
State	Fully Defined	
<b>Scope</b>		
Scoping Method	Geometry Selection	
Geometry	1 Face	
<b>Definition</b>		
Type	Fixed Support	Displacement
Suppressed	No	
Define By	Components	
Coordinate System	Global Coordinate System	
X Component	Free	
Y Component	Free	
Z Component	-10,4 mm (ramped)	

Para los resultados se selecciona el esfuerzo equivalente y la deformación plástica equivalente como lo muestran la figura 95 y 96 respectivamente. Y con estos dos parámetros se realiza la gráfica de la figura 97.

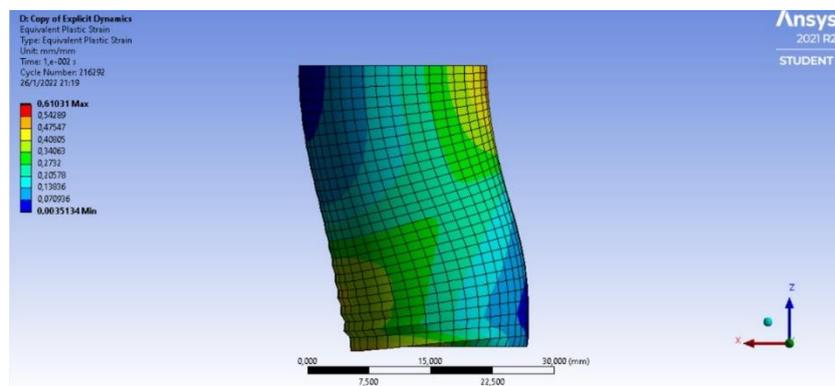
**Figura 95**

*Esfuerzo equivalente*



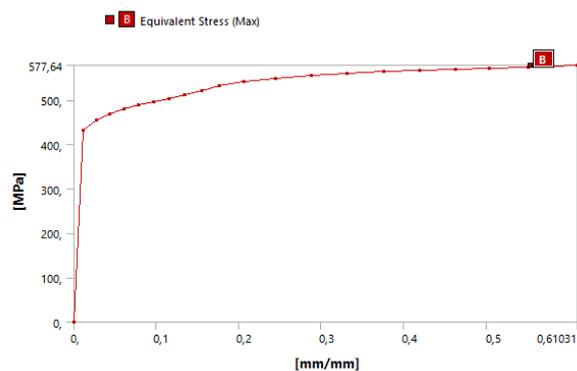
**Figura 96**

*Deformación plástica equivalente*



**Figura 97**

*Curva esfuerzo deformación obtenido*



La curva mostrada tendrá como valores los siguientes datos de la tabla 25.

**Tabla 25**

*Valores para la generación de la curva esfuerzo deformación*

<i>[B] Equivalent Stress (Max) [MPa]</i>	<i>Equivalent Plastic Strain (Max) [mm/mm]</i>
0	0
432,29	1,1687e-002
453,74	2,7383e-002
468,01	4,3775e-002
479,04	6,073e-002
488,26	7,8215e-002
496,19	9,6219e-002
503,37	0,1149
510,3	0,13442
521,46	0,15483
531,25	0,17652
540,27	0,20553
547,88	0,24461
554,34	0,28722
559,4	0,33121
563,23	0,37578
565,95	0,4199
568,1	0,46264
570,48	0,50397
573,74	0,55032
577,64	0,61031

Para el análisis de resultados se comparan los valores obtenidos con los valores del material original cuyas características se presentan en la figura 98.

**Figura 98**

*Propiedades estandarizadas del Hierro fundido Gris*

Resumen	
Nombre	Hierro gris
Fase en STP	sólido
Densidad	7150 kg / m3
Resistencia a la tracción	395 MPa
Límite de elasticidad	N / A
Módulo de Young	124 GPa
Dureza Brinell	235 BHN
Punto de fusion	1260 ° C
Conductividad térmica	53 W / mK
Capacidad calorífica	460 J / g K
Precio	1,2 \$ / kg

*Nota.* Figura tomada de Material Properties. (s. f.). Propiedades del hierro fundido

[Figura]. Hierro Gris.

## Capítulo IV

### 4. Análisis de resultados

#### 4.1 Ensayo de tensión acero dulce

En la tabla 26 se observa la diferencia que existe entre los resultados del laboratorio virtual, el cálculo en el software excel, la simulación del software Ansys Student y las características estandarizadas del material. En la tabla 27 se muestra el porcentaje de error en comparación a los valores dados del laboratorio virtual.

**Tabla 26**

*Tabla de resultados de los diferentes softwares y valores estandarizadas del material*

	<i>VirtualLabs</i>	<i>Cálculo en Excel</i>	<i>Simulación Ansys</i>	<i>Características estandarizadas del material</i>
Límite elástico (N/mm <sup>2</sup> )	356,39	356,218	356,39	250
Resistencia a la tracción (N/mm <sup>2</sup> )	549,03	548,76	587,65	400 - 550
Módulo de elasticidad (GPa)	209,09	13,96	209,09	200
Porcentaje de elongación	30,5	30,5	21,87	
Porcentaje de reducción de área	54,11	54,11	52,17	

*Nota.* En las propiedades estandarizadas no se muestran porcentajes de elongación ni reducción de área debido a que estas propiedades se calculan luego de realizarse el ensayo de tensión.

#### **Análisis**

El límite elástico da como resultados: Obtenido en “VirtualLabs” 356,39 N/mm<sup>2</sup>; calculado en excel 356,21 N/mm<sup>2</sup>; utilizado en el software Ansys 356,39 N/mm<sup>2</sup>; el material tiene un valor estándar 250 N/mm<sup>2</sup>.

La resistencia a la tracción da como resultados: Obtenido en “VirtualLabs” 549,03 N/mm<sup>2</sup>; calculada en excel 548,76 N/mm<sup>2</sup>; obtenida en el software Ansys 587,65 N/mm<sup>2</sup>; el material tiene un rango estándar 400 - 550 N/mm<sup>2</sup>.

El módulo de elasticidad da como resultados: Obtenido en “VirtualLabs” 209,09 GPa; calculado en excel 13,96 GPa; utilizado en el software Ansys 209,09

GPa; el material tiene un valor estándar 200 GPa.

El porcentaje de elongación da como resultados: Obtenido en “VirtualLabs” 30,5%; calculado en excel 30,5%; obtenido en el software Ansys 21,87%.

El porcentaje de reducción de área da como resultados: Obtenido en “VirtualLabs” 54,11%; calculado en excel 54,11%; obtenido en el software Ansys 52,17%.

### Tabla 27

*Tabla de porcentajes de error en comparación a los resultados del software Ansys.*

	VirtualLabs	Cálculo en Excel	Simulación Ansys	Características estandarizadas del material
Límite elástico %	356,39 MPa	0,05	0	29,85
Resistencia a la tracción %	549,03 MPa	0,05	7,03	Dentro del rango
Módulo de elasticidad %	209,09 GPa	93,32	0,00	4,35

### Análisis

La resistencia a la tracción del VirtualLabs en comparación al resultado obtenido en el software Ansys da un porcentaje de error de 7,03% en base a la curva esfuerzo deformación obtenida en este.

El límite elástico y el módulo de elasticidad no presentan error debido a que los valores dados por el laboratorio virtual se usan para realizar la simulación en el software Ansys.

Usando el software excel se obtiene un porcentaje de error en comparación con los resultados dados en el VirtualLabs: Límite elástico 0.05%; resistencia a la tracción 0,05%; módulo de elasticidad 93,32%.

Al comparar el resultado del VirtualLabs con el Ansys se tiene un error de 7,03% de resistencia a la tracción que es menor al 10% de tolerancia.

### **4.2 Ensayo de tensión hierro fundido**

En la tabla 28 se observa la diferencia que existe entre los resultados del

laboratorio virtual, el cálculo en el software excel, la simulación del software Ansys Student y las características estandarizadas del material. En la tabla 29 se muestra el porcentaje de error en comparación a los valores dados del laboratorio virtual.

**Tabla 28**

*Tabla de resultados de los diferentes softwares y valores estandarizados del material*

	<i>VirtualLabs</i>	<i>Cálculo en Excel</i>	<i>Simulación Ansys</i>	<i>Características estandarizadas del material</i>
<i>Límite elástico (N/mm<sup>2</sup>)</i>	156,71	165,92	156,71	No especificado
<i>Resistencia a la tracción (N/mm<sup>2</sup>)</i>	199,21	199,105	541,86	395
<i>Módulo de elasticidad (GPa)</i>	21,36	20,15	21,36	124

El límite elástico da como resultados: Obtenido en “VirtualLabs” 156.71 N/mm<sup>2</sup>; calculado en excel 165.92 N/mm<sup>2</sup>; utilizado en el software Ansys 156.71 N/mm<sup>2</sup>; el material no tiene un valor estándar especificado.

La resistencia a la tracción da como resultados: Obtenido en “VirtualLabs” 199.21 N/mm<sup>2</sup>; calculada en excel 199.105 N/mm<sup>2</sup>; obtenida en el software Ansys 541.86 N/mm<sup>2</sup>; el material tiene un valor estándar de 395 N/mm<sup>2</sup>.

El módulo de elasticidad da como resultados: Obtenido en “VirtualLabs” 21.36 GPa; calculado en excel 20.15 GPa; utilizado en el software Ansys 21.36 GPa; el material tiene un valor estándar 124 GPa.

**Tabla 29**

*Tabla de porcentajes de error en comparación a los resultados del VirtualLabs.*

	<i>VirtualLabs</i>	<i>Cálculo en Excel</i>	<i>Simulación Ansys</i>	<i>Características estandarizadas del material</i>
<i>Límite elástico %</i>	156,71 MPa	5,88	0	No especificado
<i>Resistencia a la tracción %</i>	199,21 MPa	0,05	63,23	98,28
<i>Módulo de elasticidad %</i>	21,36 GPa	5,66	0,00	95,54

La resistencia a la tracción del VirtualLabs en comparación al resultado

obtenido en el software Ansys da un porcentaje de error de 63,23% en base a la curva esfuerzo deformación obtenida en este.

El límite elástico y el módulo de elasticidad no presentan error debido a que los valores dados por el laboratorio virtual se usan para realizar la simulación en el software Ansys.

Usando el software excel se obtiene un porcentaje de error en comparación con los resultados dados en el VirtualLabs: Límite elástico 5.88%; resistencia a la tracción 0,05%; módulo de elasticidad 5.66%.

Al comparar el resultado del VirtualLabs con el Ansys se tiene un error de 63.23% de resistencia a la tracción que es mayor al 10% de tolerancia.

#### **4.3 Ensayo de compresión acero dulce**

En la tabla 30 se observa la diferencia que existe entre los resultados del laboratorio virtual, el cálculo en el software excel, la simulación del software Ansys Student y las características estandarizadas del material. En la tabla 31 se muestra el porcentaje de error en comparación a los valores dados del laboratorio virtual.

**Tabla 30**

*Tabla de resultados de los diferentes softwares y valores estandarizadas del material*

	<i>VirtualLabs</i>	<i>Cálculo en Excel</i>	<i>Simulación Ansys</i>	<i>Características estandarizadas del material</i>
<i>Límite elástico (N/mm<sup>2</sup>)</i>	213,43	259,7	213,43	250
<i>Resistencia a la compresión (N/mm<sup>2</sup>)</i>	866,09	865,66	778,27	No especificado
<i>Módulo de elasticidad (GPa)</i>	20,14	18,69	20,14	200

El límite elástico da como resultados: Obtenido en "VirtualLabs" 213.43

N/mm<sup>2</sup>; calculado en excel 259.7 N/mm<sup>2</sup>; utilizado en el software Ansys 213.43

N/mm<sup>2</sup>; el material tiene un valor estándar de 250 N/mm<sup>2</sup>.

La resistencia a la compresión da como resultados: Obtenido en "VirtualLabs"

866.09 N/mm<sup>2</sup>; calculada en excel 865.66 N/mm<sup>2</sup>; obtenida en el software Ansys

778.27 N/mm<sup>2</sup>; el material no tiene un valor estándar especificado.

El módulo de elasticidad da como resultados: Obtenido en “VirtualLabs” 20.14 GPa; calculado en excel 18.69 GPa; utilizado en el software Ansys 20.14 GPa; el material tiene un valor estándar 200 GPa.

**Tabla 31**

*Tabla de porcentajes de error en comparación a los resultados del VirtualLabs.*

	VirtualLabs	Cálculo en Excel	Simulación Ansys	Características estandarizadas del material
Límite elástico %	213,43 MPa	1,50	0	14,8
Resistencia a la compresión %	866,09 MPa	0,05	11.28	No especificado
Módulo de elasticidad %	20,14 GPa	7,20	0	89,93

La resistencia a la tracción del VirtualLabs en comparación al resultado obtenido en el software Ansys da un porcentaje de error de 11.28% en base a la curva esfuerzo deformación obtenida en este.

El límite elástico y el módulo de elasticidad no presentan error debido a que los valores dados por el laboratorio virtual se usan para realizar la simulación en el software Ansys.

Usando el software excel se obtiene un porcentaje de error en comparación con los resultados dados en el VirtualLabs: Límite elástico 1.5%; resistencia a la tracción 0.05%; módulo de elasticidad 7.20%.

Al comparar el resultado del VirtualLabs con el Ansys se tiene un error de 11.28% en la resistencia a la tracción que es mayor al 10% de tolerancia.

#### **4.4 Ensayo de compresión hierro fundido**

En la tabla 32 se observa la diferencia que existe entre los resultados del laboratorio virtual, el cálculo en el software excel, la simulación del software Ansys Student y las características estandarizadas del material. En la tabla 33 se muestra el porcentaje de error en comparación a los valores dados del laboratorio virtual.

**Tabla 32**

*Tabla de resultados de los diferentes softwares y valores estandarizadas del material*

	<i>VirtualLabs</i>	<i>Cálculo en Excel</i>	<i>Simulación Ansys</i>	<i>Características estandarizadas del material</i>
<i>Límite elástico (N/mm<sup>2</sup>)</i>	382,17	381,97	382,17	No especificado
	<i>VirtualLabs</i>	<i>Cálculo en Excel</i>	<i>Simulación Ansys</i>	<i>Características estandarizadas del material</i>
<i>Resistencia a la compresión (N/mm<sup>2</sup>)</i>	828,03	827,61	577,64	572 – 1380
<i>Módulo de elasticidad (GPa)</i>	19,29	17,32	19,29	124

El límite elástico da como resultados: Obtenido en “VirtualLabs” 382.17 N/mm<sup>2</sup>; calculado en excel 381.97 N/mm<sup>2</sup>; utilizado en el software Ansys 382.17 N/mm<sup>2</sup>; el material no tiene un valor estándar especificado.

La resistencia a la tracción da como resultados: Obtenido en “VirtualLabs” 828.03 N/mm<sup>2</sup>; calculada en excel 827.61 N/mm<sup>2</sup>; obtenida en el software Ansys 577.64 N/mm<sup>2</sup>; el material tiene un rango estándar de 572 – 1380 N/mm<sup>2</sup>.

El módulo de elasticidad da como resultados: Obtenido en “VirtualLabs” 19.29 GPa; calculado en excel 17.32 GPa; utilizado en el software Ansys 19.29 GPa; el material tiene un valor estándar 124 GPa.

### **Tabla 33**

*Tabla de porcentajes de error en comparación a los resultados del VirtualLabs.*

	<i>VirtualLabs</i>	<i>Cálculo en Excel</i>	<i>Simulación Ansys</i>	<i>Características estandarizadas del material</i>
<i>Límite elástico %</i>	213,43	0,05	0	No especificado
<i>Resistencia a la compresión %</i>	866,09	0,05	30,24	Dentro del rango
<i>Módulo de elasticidad %</i>	20,14	10,21	0,00	84,44

La resistencia a la tracción del VirtualLabs en comparación al resultado obtenido en el software Ansys da un porcentaje de error de 30,24% en base a la curva esfuerzo deformación obtenida en este.

El límite elástico y el módulo de elasticidad no presentan error debido a que

los valores dados por el laboratorio virtual se usan para realizar la simulación en el software Ansys.

Usando el software excel se obtiene un porcentaje de error en comparación con los resultados dados en el VirtualLabs: Límite elástico 0.05%; resistencia a la tracción 0,05%; módulo de elasticidad 10.21%.

Al comparar el resultado del VirtualLabs con el Ansys se tiene un error de 30.24% de resistencia a la tracción que es mayor al 10% de tolerancia.

## Capítulo V

### Conclusiones y recomendaciones

#### 5.1 Conclusiones

- Las propiedades mecánicas fueron obtenidas mediante el laboratorio virtual “VirtualLabs” con los siguientes resultados:
  - Ensayo de tensión acero dulce  
Límite elástico 356,39 MPa; resistencia a la tracción 549,03 MPa; Módulo de elasticidad 209,09 GPa; Porcentaje de elongación 30,5%, Porcentaje de reducción de área 54,11%.
  - Ensayo de tensión hierro fundido  
Límite elástico 156,71 MPa; Resistencia a la tracción 199,21 MPa, módulo de elasticidad 21,36 GPa.
  - Ensayo de compresión acero dulce  
Límite elástico 213,43 MPa; Resistencia a la compresión 866,09 MPa, módulo de elasticidad 20,14 GPa.
  - Ensayo de compresión hierro fundido  
Límite elástico 382,17 MPa; Resistencia a la tracción 828,03 MPa, módulo de elasticidad 19,29 GPa.
- Se obtuvieron las propiedades mecánicas de los materiales mediante el software Ansys, dando como resultados:
  - Ensayo de tensión acero dulce  
Límite elástico 356,39 (N/mm<sup>2</sup>); resistencia a la tracción 587,65 (N/mm<sup>2</sup>), módulo de elasticidad 209,09 (GPa); porcentaje de elongación 21,87 %; porcentaje de reducción de área 52,17 %.
  - Ensayo de tensión hierro fundido  
Límite elástico 156,71 (N/mm<sup>2</sup>); resistencia a la tracción 541,86 (N/mm<sup>2</sup>) módulo de elasticidad 21,36 (GPa).

- Ensayo de compresión acero dulce  
Límite elástico 213,43 (N/mm<sup>2</sup>); resistencia a la compresión 541,86 (N/mm<sup>2</sup>); módulo de elasticidad 20,14 (GPa)
- Ensayo de compresión hierro fundido  
Límite elástico 382,17 (N/mm<sup>2</sup>); resistencia a la compresión 577,64 (N/mm<sup>2</sup>); módulo de elasticidad 19,29 (GPa)
- Debido a que se tiene un porcentaje de error mayor al 10% en los ensayos: tracción del hierro fundido, compresión de acero dulce y compresión de hierro fundido se establece que el laboratorio virtual “VirtualLabs” no se debe usar como herramienta de reemplazo para el ensayo de compresión o tracción.
- La librería de materiales del software Ansys están basadas en las propiedades estandarizadas de los materiales, lo que da una gran diferencia con los valores del laboratorio virtual dando como resultado: la herramienta VirtualLabs es una opción educativa y didáctica para conocer el procedimiento y realizar cálculos teóricos que ayudarán a tener una idea de cómo se maneja una máquina de ensayos universal.
- La simulación dinámica explícita que ofrece el software Ansys ayuda a visualizar las deformaciones que tendrá un material al ser sometido a un tipo de carga de manera precisa, pero, requiere de un computador con hardware compatible con el software para que sus resultados se puedan obtener de manera precisa y no muy demorada, la simulación se encontrará en los anexos.

## 5.2 Recomendaciones

- Se recomienda a los diseñadores del laboratorio virtual “VirtualLabs” especificar el tipo del material a usarse en los ensayos, debido a que bajo el título “Acero dulce” y “Hierro fundido” se encuentra una gran variedad de tipos de material que tienen distintas propiedades y darán resultados diferentes al momento de obtener sus características mediante la aplicación de cálculos y simulación en software CAD.
- Utilizar un laboratorio virtual que posea licencia para ejercer como software de reemplazo a un laboratorio físico.
- A nuevos investigadores se les recomienda crear videos guía o tutoriales que indiquen el uso correcto del software Ansys y el manejo de sus librerías.
- Utilizar el software Ansys como herramienta de diseño o educativa gracias a que su librería que se basa en las propiedades estandarizadas de los materiales.
- Realizar las simulaciones en un computador con hardware de video compatible para reducir el tiempo de cálculo de los ensayos y aumentar la precisión de los resultados.

## Bibliografía

- Aguilar Juárez, I., & HEREDIA ALONSO, J. R. (2013). *Simuladores y laboratorios virtuales para Ingeniería en Computación*. Texcoco: Centro Universitario UAEM.
- Alarcón Pupiales, Á. A. (2018). *MÁQUINA UNIVERSAL DE ENSAYOS DESTRUCTIVOS: SISTEMA MÓVIL*. Ibarra: Universidad Técnica del Norte. Obtenido de <http://repositorio.utn.edu.ec/handle/123456789/8561>
- Álvarez, I. (2005). *Sistema de Laboratorios Virtuales para la Disciplina Resistencia de Materiales*. Universidad Central "Marta Abreu" de las Malvinas. Obtenido de <http://hdl.handle.net/123456789/176>. Recuperado el: 01 noviembre de 2021.
- Askeland, D. R. (2013). *Ciencia e Ingeniería de Materiales*. México: CENGAGE Learning. doi:978-1-305-07710-2
- ASTM International. (2000). *Mechanical Testing and Evaluation*. ASM International.
- Balbatín, A. (15 de Junio de 2016). *Ensayos y propiedades mecánicas de los materiales*. Obtenido de [Dicis.ugto.mx](http://www.dicis.ugto.mx):  
<http://www.dicis.ugto.mx/profesores/balvantin/documentos/Ciencia%20de%20Materiales%20para%20Ingenieria%20Mecanica/Unidad%20I%20-%201.%20Ensayos%20y%20Propiedades%20de%20Materiales.pdf>.  
Recuperado el 05 noviembre 2021
- Barba, A., Gonzáles, R., Valdez, R., Covelo, A., Hernández, M., & Cabrera, J. (2019). Incorporación de herramientas virtuales para la Enseñanza de Técnicas de Caracterización de Materiales. Experiencias y Propuestas. *MEMORIAS DEL XXV CONGRESO INTERNACIONAL ANUAL DE LA SOMIM*. Obtenido de [http://somim.org.mx/memorias/memorias2019/articulos/A5\\_100.pdf](http://somim.org.mx/memorias/memorias2019/articulos/A5_100.pdf).  
Recuperado el 08 noviembre 2021.

- Beer, F. P. (2010). *Mecánica de Materiales*. México, D. F: Mc Graw Hill.
- Beer, F., Johnston, R., Dewolf, J., & Mazurek, D. (2009). *Mecánica de Materiales*. México D.F.: McGraw-Hill. doi:978-607-15-0263-6
- Brainon Engineers. (2020). *Introducción a Ansys Workbench*. Obtenido de Brainon Engineers: <https://brainonengineers.com/blog/ansys/introduccion-a-ansys-workbench/>. Recuperado el 13 de noviembre 2021.
- CLASESDEMECANICA. (s.f.). *Momentos de inercia*. Obtenido de Clasesdemecanica.net: <https://clasesdemecanica.net/index.php/momentos-de-inercia/>. Recuperado el 15 noviembre 2021.
- Espinoza, F. (1982). *Ensayos mecánicos en metales*. Monterrey N.L.: Universidad Autónoma de León.
- Hibbeler, R. C. (2011). *Mecánica de Materiales*. México: PEARSON EDUCACIÓN. Obtenido de <https://aportesingecivil.com/mechanics-of-materials-10th-edition-hibbeler/>. Recuperado el 19 noviembre de 2021.
- Instron. (s.f.). *Modulus of Elasticity*. Obtenido de Instron.com: <https://www.instron.com/en-us/our-company/library/glossary/m/modulus-of-elasticity?region=North%20America&lang=en-US>. Recuperado el 22 noviembre 2021.
- Kobelco. (18 de noviembre de 2021). *Límite de Elasticidad y el 0.2% de Límite Elástico Convencional*. Obtenido de kobelco-welding.jp: [https://www.kobelco-welding.jp/espanol/education-center/abc/ABC\\_2005-04.html](https://www.kobelco-welding.jp/espanol/education-center/abc/ABC_2005-04.html). Recuperado el 26 noviembre de 2021.
- Lyle, F., & Rosa, A. (2005). The Role of the Laboratory in Undergraduate Engineering Education. *Journal of Engineering Education*, 121-130. doi:doi.org/10.1002/j.2168-9830.2005.tb00833.x
- Material Properties. (s.f.). *Acero dulce – Densidad – Resistencia – Dureza – Punto de fusión*. Obtenido de Material-properties.org: <https://material-properties.org/es/acero-dulce-densidad-resistencia-dureza-punto-de-fusion/>.

Recuperado el 29 noviembre de 2021.

Material properties. (s.f.). *Hierro gris – Densidad – Resistencia – Dureza – Punto de fusión*. Obtenido de Material-properties.org: <https://material-properties.org/es/hierro-gris-densidad-resistencia-dureza-punto-de-fusion/>.

Recuperado el 03 diciembre de 2021

NITK Surathkal. (18 de noviembre de 2021). *Compression Test on Mild Steel*.

Obtenido de Virtual Labs: <https://sm-nitk.vlabs.ac.in/exp15/index.html#>.

Recuperado el 06 diciembre de 2021

Pérez, A., Pimentel, J., Martínez, J., & Pérez, S. (2013). Laboratorios virtuales:

alternativa en la educación. *La ciencia y el hombre, XXVI*. Obtenido de

<https://www.uv.mx/cienciahombre/revistae/vol26num2/articulos/laboratorios.html>. Recuperado el 10 diciembre de 2021.

Ruíz, D. H. (2006). *Fundamentos y ensayos en materiales metálicos*. Buenos Aires:

MDC MACHINE S. A. doi:ISBN 950-00-0547-6

UTEST. (20 de Noviembre de 2021). *Máquina Universal Electromecánica*. Obtenido

de Utest: <https://www.utest.com.tr/es/26025/M-quina-Universal-Electromec-nica>. Recuperado el 13 diciembre de 2021.

Zapata Urán, C. H. (2015). El sistema CAD: una herramienta fundamental en los

procesos de diseño. *Escritos en la Facultad N°108*, 121-125. doi:ISSN 1669-

2306

# ANEXOS