



UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA

SEDE QUITO

CARRERA DE MECÁNICA

**EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL ACABADO SUPERFICIAL EN LA
RESISTENCIA A LA TORSIÓN DE ALEACIONES DE BRONCE FABRICADAS
MEDIANTE MECANIZADO EN SECO**

Trabajo de titulación previo a la obtención del

Título de Ingeniero Mecánico

AUTOR: DARIAN FRANCISCO TUSA MALLA

TUTOR: EDUARDO XAVIER VACA MICHILENA

Quito – Ecuador

2025

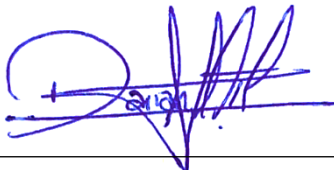
CERTIFICADO DE RESPONSABILIDAD Y AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Darian Francisco Tusa Malla con documento de identificación No 1727995217, manifiesto que:

Soy el autor y responsable del presente trabajo; y, autorizo a que sin fines de lucro la Universidad Politécnica Salesiana pueda usar, difundir, reproducir o publicar de manera total o parcial el presente trabajo de titulación.

Quito, 17 de octubre del año 2025

Atentamente,



Darian Francisco Tusa Malla

1727995217

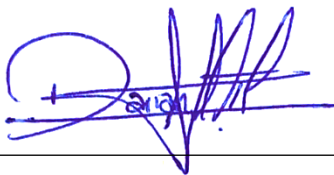
**CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE
TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA**

Yo, Darian Francisco Tusa Malla con documento de identificación No 1727995217, expreso mi voluntad y por medio del presente documento cedemos a la Universidad Politécnica Salesiana la titulación sobre los derechos patrimoniales en virtud de que soy autor de la Propuesta Tecnológica: “evaluación de la influencia del acabado superficial en la resistencia a la torsión de aleaciones de bronce fabricadas mediante mecanizado en seco”, el cual ha sido desarrollado para optar por el título de: Ingeniero Mecánico, en la Universidad Politécnica Salesiana, quedando la Universidad facultada para ejercer plenamente los derechos cedidos anteriormente.

En concordancia con los manifestado, suscribo este documento en el momento que hago la entrega del trabajo final en formato digital a la Biblioteca de la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 17 de octubre del año 2025

Atentamente,



Darian Francisco Tusa Malla

1727995217

CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN

Yo, Eduardo Xavier Vaca Michilena con documento de identificación N° 1721078424, docente de la Universidad Politécnica Salesiana, declaro que bajo mi tutoría fue desarrollado el trabajo de titulación: EVALUACIÓN DE LA INFLUENCIA DEL ACABADO SUPERFICIAL EN LA RESISTENCIA A LA TORSIÓN DE ALEACIONES DE BRONCE FABRICADAS MEDIANTE MECANIZADO EN SECO, realizado por Darian Francisco Tusa Malla con documento de identificación N° 1727995217, obteniendo como resultado final el trabajo de titulación bajo la opción Propuesta Tecnológica que cumple con todos los requisitos determinados por la Universidad Politécnica Salesiana.

Quito, 17 de octubre del año 2025

Atentamente,



Ing. Eduardo Xavier Vaca Michilena, MSc.

1721078424

DEDICATORIA

Todo mi esfuerzo va dedicado a mis padres, a mi papá Carlos Tusa que siempre me da su apoyo incondicional, me da palabras de aliento, me da consejos y sobre todo me da su esfuerzo para poner llegar a tener éxito en la vida.

A mi mamá Lorena Malla que me brinda su apoyo en todo, que me cuida, que se preocupa por mi día a día y siempre me tiene presente en sus oraciones, a mi hermana Dana Tusa que ha llegado a mi vida para alegrarla más y ser el motivo de que quiera superarme.

A mis abuelitos Ignacio Tusa y Juana Ulco, que son mis segundos padres, son parte de mi motivación, son ese motor de mi vida que me hace querer seguir adelante y poder hacerlos más felices, finalmente a mis tíos y tías que siempre me cuidan, me guían y se enorgullecen de mis logros.

Darian Francisco Tusa Malla

AGRADECIMIENTO

Primero quiero agradecer a Dios por darme la oportunidad de estudiar, aprender y superarme, ya que sin él nada de lo que he logrado sería posible, luego quiero agradecer de una manera muy especial a mis padres Carlos Tusa y Lorena Malla, por apoyarme a lo largo de mi camino hacia la meta, gracias por su sacrificio y confianza en mí. De igual manera deseo mencionar a mi hermana, mis abuelitos y a toda mi familia en general, porque siempre están pendientes y nunca me han dejado solo, todos me han ayudado mucho con algún consejo o palabras de aliento que por más pequeñas que parezcan, a mí me llenan de confianza y fuerza.

Finalmente quiero agradecer también a amigos por todo lo que vivimos a lo largo de nuestra carrera, estoy seguro de que creceremos como profesionales y personas, finalmente gracias a todos los docentes que me enseñaron y brindaron su conocimiento para afrontar con fuerza la vida profesional que me espera.

Darian Francisco Tusa Malla

ÍNDICE DE CONTENIDO

CERTIFICADO DE CESIÓN DE DERECHOS DE AUTOR DEL TRABAJO DE TITULACIÓN A LA UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA	iii
CERTIFICADO DE DIRECCIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN	iv
DEDICATORIA	v
AGRADECIMIENTO	vi
ÍNDICE DE CONTENIDO	vii
ÍNDICE DE TABLAS	xi
ÍNDICE DE FIGURAS	xiii
RESUMEN	xvi
ABSTRACT	xvii
INTRODUCCIÓN.....	18
OBJETIVOS	19
CAPÍTULO I	20
1.1 Aleaciones de bronce.....	20
1.1.1. Bronce fosfórico C83600	20
1.1.2. Composición química bronce fosfórico	21
1.2 Bronce naval (AB2).....	21
1.2.1. Composición química bronce naval	23
1.3 Propiedades mecánicas de las aleaciones	23
1.3.1. Bronce fosfórico SAE40	23
1.3.2. Bronce naval AB2	24
1.4 ISO 7800	25
1.4.1. Condiciones de prueba	25
1.4.2. Tubos de ensayo	25
1.5 Equipo para ensayo a torsión.....	26

1.5.1. Parámetros técnicos.....	26
1.5.2. Condiciones de trabajo	27
1.6 Calidad de la superficie del objeto	28
1.6.1. Acabado superficial.....	28
1.6.2. Rugosidad.....	28
1.6.3. Parámetros de las texturas superficiales.....	30
1.6.4. Factores de mecanizado.....	32
1.7 Fórmulas de los parámetros de rugosidad	33
1.8 Equipo para medir la rugosidad.....	34
1.9 Torno	36
1.10 Materiales para herramientas de corte.....	36
1.10.1. Forma y características de la plaquita	39
1.11 Cuchilla de cilindrado	40
1.11.1. Cuchilla de refrentado	42
1.12 Torno convencional.....	43
1.13 Tornos CNC	44
1.14 Mecanizado en seco.....	46
1.15 Parámetros de corte	46
1.15.1. Velocidad de corte (V_c)	46
1.15.2. Velocidad de avance (V_f).....	47
1.16 Torsión	48
1.16.1. Torsión en una sección circular.....	49
1.16.2. Rigidez torsional.....	51
1.16.3. Esfuerzo cortante.....	52
1.16.4. Concentrador de esfuerzos	52
1.16.5. Diagrama esfuerzo – deformación	52
1.16.6. Diagrama torque – ángulo de giro.....	53
CAPÍTULO II.....	54

2.1	Proceso Metodológico.....	54
2.2	Muestra para ensayo.....	55
2.2.1.	Forma y tamaño de la muestra	56
2.2.2.	Dimensionamiento de la muestra	56
2.3	Herramienta de mecanizado	57
2.3.1.	Inserto.....	57
2.3.2.	Radio de punta.....	60
2.3.3.	Parámetros de corte para el mecanizado	60
2.4	Valores para las probetas.....	60
2.5	Cálculos para la obtención del acabado	61
2.6	Proceso de mecanizado de las probetas.....	62
2.7	Valores de rugosidad obtenidos con los diferentes avances.....	66
2.8	Resultados tabulados del ensayo	68
CAPÍTULO III		78
3.1	Análisis observacional de Quito.....	78
3.1.1.	Probetas N10 – bronce naval AB2	78
3.1.2.	Probetas N7 – bronce naval AB2	78
3.1.3.	Probetas N10 – bronce fosfórico SAE40	79
3.1.4.	Probetas N7 – bronce fosfórico SAE40	80
3.2	Análisis comparativo de resultados en Quito.....	80
3.2.1.	Producción porcentual bronce naval	80
3.2.2.	Comparación bronce fosfórico	81
3.2.3.	Producción porcentual bronce naval – bronce fosfórico	81
3.3	Análisis observacional de Cuenca.....	82
3.3.1.	Probetas N7 – bronce fosfórico.....	82
3.3.2.	Probetas N9 – bronce fosfórico.....	83
3.3.3.	Probetas N9 – bronce naval.....	83
3.4	Análisis comparativo de resultados en Cuenca	84

3.4.1. Producción porcentual bronce fosfórico.....	84
3.4.2. Producción porcentual entre bronce fosfórico y naval.....	85
3.5 Análisis comparativo de resultados SolidWorks.....	87
3.5.1. Producción porcentual del bronce con diferentes acabados.....	87
3.6 Comparación de todos los resultados	88
3.6.1. Resultados del ensayo comparados con la simulación.....	88
CONCLUSIONES	92
RECOMENDACIONES	93
REFERENCIAS	94
ANEXOS	101

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Estructura química del bronce SAE40	21
Tabla 2. Composición química del bronce AB2	23
Tabla 3. Propiedades mecánicas bronce SAE40	24
Tabla 4. Propiedades mecánicas bronce AB2	24
Tabla 5. Velocidad nominal de ensayo par alambres redondos y perfilados	26
Tabla 6. Parámetros técnicos	27
Tabla 7. Categorización de rugosidades	30
Tabla 8. Resumen de los parámetros aritméticos	31
Tabla 9. Descripción de las variables independientes	32
Tabla 10. Definición de las variables dependientes	33
Tabla 11. Especificaciones del rugosímetro	35
Tabla 12. Características de las plaquitas para torneado	40
Tabla 13. Torno EMCOMAT E-200, datos técnicos	44
Tabla 14. Rangos de velocidad del husillo	45
Tabla 15. Efectos de la velocidad de corte	47
Tabla 16. Efectos por la velocidad de avance	48
Tabla 17. Condiciones de corte recomendadas del inserto	58
Tabla 18. Parámetros del inserto DCMT 11T304 PM 4335	59
Tabla 19. Parámetros para el acabado superficial	60
Tabla 20. Parámetros seleccionados para realizar las muestras	61
Tabla 21. Tabla de valores de rugosidad en bronce naval	67
Tabla 22. Tabla de valores de rugosidad en bronce fosfórico	67
Tabla 23. Datos del ensayo del bronce naval en Quito.	68
Tabla 24. Datos del ensayo del bronce fosfórico en Quito	69
Tabla 25. Resultados de Cuenca de las dos aleaciones de bronce	70
Tabla 26. Resultados del torque de la simulación.	76
Tabla 27. Comparación del torque promedio del bronce naval obtenido en Quito	81
Tabla 28. Comparación de torque entre aleaciones de acabado N10 obtenidos en Quito	82
Tabla 29. Comparación del torque y ángulo promedio de Cuenca, del acabado N7 y N9	85

Tabla 30. Comparación del torque y ángulo de Cuenca, en bronce fosfórico (N7 y N9) y naval (N9).....	86
Tabla 31. Ángulo de torsión con acabados iguales en Cuenca.....	90
Tabla 32. Ángulo de torsión con acabados iguales en Quito	90

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Bronce SAE40	20
Figura 2. Bronce AB2/naval.....	22
Figura 3. Escala de observación para evaluar la rugosidad.....	29
Figura 4. Objetos con diferentes rugosidades	29
Figura 5. Rugosidad promedio	33
Figura 6. Parámetros de rugosidad.....	34
Figura 7. Equipo Mitutoyo SJ-210.....	35
Figura 8. Equipo Mitutoyo SJ-210.....	36
Figura 9. Rugosidad en función del avance y radio de punta	39
Figura 10. Ángulos de la herramienta	39
Figura 11. Plaquitas de diversas geometrías	40
Figura 12. Cilindrado	41
Figura 13. Cuchilla de cilindrado.....	41
Figura 14. Radio y ángulo de punta de la cuchilla de cilindrado	41
Figura 15. Ángulo de despullo y ataque de la cuchilla de cilindrado	42
Figura 16. Refrentado.....	42
Figura 17. Cuchilla de refrentado.....	42
Figura 18. Cuchilla de refrentado, radio y ángulo de punta	43
Figura 19. Ángulo de despullo y ataque de la cuchilla de refrentado	43
Figura 20. Torno convencional y sus partes principales	43
Figura 21. Torno EMCOMAT E-200	44
Figura 22. Barra donde actúan 2 pares de torsión	48
Figura 23. Barra circular sometida a torsión y su ángulo de giro	49
Figura 24. Fenómeno torsional.....	51
Figura 25. Fenómeno torsional en materiales frágiles	51
Figura 26. Barra libre sometida a una torsión	51
Figura 27. Diagrama esfuerzo-deformación.....	53
Figura 28. Diagrama momento torsor-ángulo de giro.....	53
Figura 29. Flujograma de la metodología para el Capítulo II.	55
Figura 30. Forma y dimensiones de la muestra.....	56

Figura 31. Dimensionamiento de las probetas.	56
Figura 32. Vista isométrica de la probeta.....	57
Figura 33. Modelo 3D del inserto	58
Figura 34. Inserto DCMT 11T304.	58
Figura 35. Ilustraciones técnicas del inserto	60
Figura 36. Fresado hexagonal del bronce naval.....	62
Figura 37. Fresado hexagonal del bronce fosfórico.	62
Figura 38. Unidad de control CNC durante el mecanizado de las probetas.....	63
Figura 39. Posicionamiento de las probetas en el torno CNC.....	63
Figura 40. Inserto utilizado en el mecanizado CNC.	64
Figura 41. Mecanizado CNC de probetas de bronce naval.	64
Figura 42. Mecanizado CNC de probetas de bronce fosfórico.	65
Figura 43. Probetas mecanizadas y sin mecanizar.	65
Figura 44. Medición de las probetas para corroborar medidas.	66
Figura 45. Rugosidad obtenida para N7.....	66
Figura 46. Rugosidad obtenida para N9.....	66
Figura 47. Rugosidad obtenida para N10.....	67
Figura 48. Torque - Acabado, resultados del N7 y N10 de bronce naval.	69
Figura 49. Torque - Acabado, resultados del N10 de bronce fosfórico.	70
Figura 50. Torque en bronce fosfórico con acabados N7 y N9, y bronce naval N9.	71
Figura 51. Ángulo – Acabado superficial en bronce fosfórico (N7 y N9) y en naval (N9)....	71
Figura 52. Máquina a torsión de Cuenca.....	72
Figura 53. Acabado superficial N7 de la probeta de bronce.	72
Figura 54. Lado fijo y lado rotacional de la probeta N7.	73
Figura 55. Límite elástico de la probeta de bronce N7.	73
Figura 56. Resultado en $[N \cdot m]$ del análisis no lineal para N7.	73
Figura 57. Acabado superficial N9 de la probeta de bronce.	74
Figura 58. Lado fijo y lado rotacional de la probeta N9.	74
Figura 59. Límite elástico de la probeta de bronce N9.	74
Figura 60. Resultado en $[N \cdot m]$ del análisis no lineal para N9.	75
Figura 61. Acabado superficial N10 de la probeta de bronce.	75

Figura 62. Lado fijo y lado rotacional de la probeta N10.	75
Figura 63. Límite elástico de la probeta de bronce N10.	76
Figura 64. Resultado en $[N \cdot m]$ del análisis no lineal para N10.	76
Figura 65. Torque – Acabado de la simulación en una probeta de bronce.	77
Figura 66. Ensayo de probetas de bronce naval N10.	78
Figura 67. Ensayo de probetas de bronce naval N7.	79
Figura 68. Ensayo de probetas de bronce fosfórico N10.	79
Figura 69. Ensayo de probetas N7 en bronce fosfórico.	80
Figura 70. Probeta N7 en bronce fosfórico luego del ensayo.	82
Figura 71. Primera probeta N9 en bronce fosfórico luego del ensayo.	83
Figura 72. Segunda probeta N9 en bronce fosfórico luego del ensayo.	83
Figura 73. Tercera probeta N9 en bronce fosfórico luego del ensayo.	83
Figura 74. Primera probeta N9 en bronce naval luego del ensayo.	84
Figura 75. Segunda probeta N9 en bronce naval luego del ensayo.	84
Figura 76. Tercera probeta N9 en bronce naval luego del ensayo.	84
Figura 77. Torque máximo – Acabado superficial, de los ensayos.	89
Figura 78. Ángulo de torsión – Ensayos de acabados iguales en las dos aleaciones.	91

RESUMEN

En el presente proyecto se realizó una evaluación experimental sobre cómo influye el acabado superficial en la resistencia a la torsión de aleaciones de bronce, específicamente en el bronce Naval AB2 y el bronce Fosfórico SAE40, el estudio se centró en analizar cómo los niveles de acabado superficial generados mediante mecanizado en seco con parámetros controlados, afectan la capacidad de los materiales para resistir esfuerzos torsionales. Se diseñaron y mecanizaron probetas con tres tipos de texturas superficiales: lisas, ásperas y rugosas, utilizando el torno CNC y un inserto de carburo cementado. Posteriormente, se realizaron ensayos a torsión en máquinas de Quito, Cuenca y simulación en programas especializados como SolidWorks con el objetivo de determinar el torque máximo soportado por los distintos tipos de probeta y el número de giros que soporta cada muestra hasta la fractura por torsión. Los resultados indicaron que las probetas con acabado superficial rugoso presentaron una reducción del 22,9% en la resistencia a la torsión respecto a las del acabado superficial más fino, además las muestras de bronce Naval mostraron un mejor desempeño frente a la deformación torsional en comparación con las del bronce Fosfórico, independientemente del nivel de rugosidad. Los resultados evidencian que la influencia de las propiedades mecánicas propias de cada aleación, y también la relevancia del acabado superficial son factores críticos para garantizar un comportamiento mecánico confiable en componentes sometidos a torsión dentro del entorno industrial.

Palabras clave: Acabado superficial, torsión, mecanizado en seco, parámetros de corte, probetas.

ABSTRACT

In this study, an experimental evaluation was conducted to determine how the surface finish influences the torsional strength of bronze alloys, specifically Naval AB2 and SAE40 phosphoric bronzes. This study focused on analyzing how surface finish levels generated by dry machining with controlled parameters affect the ability of materials to resist torsional stresses. Test specimens with three types of surface textures (smooth, rough, and coarse) were designed and machined using a CNC lathe and cemented carbide insert. Subsequently, torsion tests were performed on machines in Quito and Cuenca and in simulation specialized programs such as SolidWorks to determine the maximum torque supported by the different types of test pieces and the number of turns that each sample could withstand until it fractured under torsion. The results indicated that the test pieces with a rough surface finish showed a 22,9% reduction in torsional strength compared with those with a finer surface finish. In addition, the Naval bronze samples performed better under torsional stress than the Phosphoric bronze samples, regardless of the level of roughness. The results show that the mechanical properties of each alloy and the relevance of the surface finish are critical factors in ensuring reliable mechanical performance in components subjected to torsion in an industrial environment.

Keywords: Surface finish, torsion, dry machining, cutting parameters, specimens.

INTRODUCCIÓN

En actualidad en la industria se busca la eficiencia de energía y la manufactura más eficiente de los procesos, que se han convertido en factores claves para la mejora continua dentro del mercado. El presente estudio cobra importancia al analizar del comportamiento de material como algunas aleaciones de bronce durante el mecanizado permitiendo identificar condiciones acertadas que no solo aseguren un acabado superficial adecuado, sino que, también aseguren una excelente resistencia a la torsión [1], [2].

Al considerar la resistencia de materiales también es importante su microestructura y la composición de fases, en donde fases ricas en estaño presentan mayor resistencia frente a ambientes agresivos, además, teniendo en cuenta el acabado superficial son factores determinantes para el desempeño mecánico, durabilidad y condiciones de servicio real [2].

Diferentes estudios demuestran que variaciones en la rugosidad tienen cierta influencia en la resistencia a torsión de diferentes materiales, en donde se muestra que acabados más finos contribuyen a una mejor distribución de tensiones y mayor resistencia estructural, lo que da mayor importancia a parámetros de corte controlados en materiales como el bronce [3], [4].

Así también, diferentes análisis comparan cómo distintas condiciones de fabricación y tratamientos inciden en la respuesta mecánica de materiales, además han destacado la relevancia del comportamiento estructural bajo acciones como la torsión [4].

En el Capítulo I presenta una revisión de los fundamentos teóricos necesarios para comprender la relación entre el mecanizado en seco, el acabado superficial y la resistencia a torsión entre las aleaciones de bronce, ya que, se abordan conceptos sobre propiedades mecánicas, tipos de esfuerzos, parámetros de corte y su influencia en el acabado superficial.

En el Capítulo II se muestra el desarrollo experimental, detallando equipos, procedimientos y parámetros empleados en el mecanizado. Finalmente, en el Capítulo III se detalla el análisis de datos basados en los resultados obtenidos, para las conclusiones correspondientes del estudio.

OBJETIVOS

Objetivo General

Evaluar la influencia del acabado superficial en la resistencia a la torsión de aleaciones de bronce fabricadas mediante mecanizado en seco.

Objetivos Específicos

- Identificar las propiedades mecánicas a la torsión de las aleaciones de bronce naval y bronce fosfórico disponibles comercialmente.
- Definir el diseño experimental basado en la norma ISO 7800 para ensayos de resistencia a la torsión y la rugosidad superficial.
- Determinar la variación del acabado superficial modificando los parámetros de corte en el mecanizado de las muestras.
- Analizar el efecto de la rugosidad en la resistencia a la torsión de las muestras mecanizadas en bronce naval y bronce fosfórico.

CAPÍTULO I

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

1.1 Aleaciones de bronce

El bronce es una aleación de cobre y estaño principalmente, conocida por su resistencia y excelente comportamiento frente a la corrosión, lo que la hace ideal para piezas mecánicas.

1.1.1. *Bronce fosfórico C83600*

Esta aleación de bronce es una de las más utilizadas porque ofrece gran resistencia al desgaste y prolonga la vida útil de los diversos componentes o maquinarias, es muy llamativa por su grano fino, sus bajos coeficientes de fricción, su tenacidad y su durabilidad [5] [6].

En la Figura 1 se muestran distintas presentaciones del bronce fosfórico encontrados para trabajos de la industria.

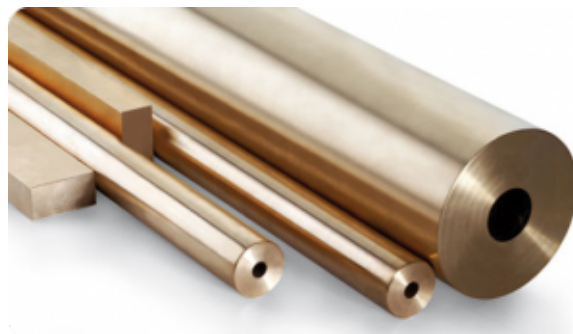


Figura 1. Bronce SAE40 [7].

- **Aplicaciones**

Entre algunas de sus aplicaciones se encuentran [8]:

- Engranés y ruedas dentadas.
- Cuerpos de válvulas.
- Accesorios hidráulicos.
- Bujes.
- Aplicaciones marinas.

- Partes de bombas.
- **Propiedades**
 - Alta resistencia al desgaste: Ideal para componentes en constante fricción gracias a la adición del fósforo, ya que mejora la resistencia al desgaste del bronce [9].
 - Buena conductividad térmica y eléctrica: No tan conductivo como el caso del cobre puro, pero con buenas propiedades térmicas y eléctricas [9].
 - Resistencia a la corrosión: Ideal para trabajos con exposición al agua y productos químicos [9].

1.1.2. Composición química bronce fosfórico

La Tabla 1 muestra la estructura química del bronce SAE40.

Tabla 1. Estructura química del bronce SAE40, [10].

Composición química (%)	
Bronce SAE 40	
Cobre (Cu)	84 – 86
Estaño (Sn)	4 – 6
Zinc (Zn)	4 – 6
Plomo (Pb)	4 – 6
Aluminio (Al)	0.005 máx.
Hierro (Fe)	0.3 máx.
Níquel (Ni)	1 máx.
Azufre (S)	0.08 máx.
Antimonio (Sb)	0.25 máx.
Silicio (Si)	0.05 x.

1.2 Bronce naval (AB2)

El bronce naval o conocido también como bronce al aluminio es una aleación que pertenece a la subfamilia de los latones alfa-beta o dúplex diseñada para mejorar componentes en cuanto a su resistencia a la corrosión como su facilidad de mecanizado [11].

El ser utilizado mayormente en aplicaciones marinas le dio su nombre característico, pero lo que más resalta es su solidez frente a ambientes agresivos como el agua salada y también el agua dulce. El bronce naval soporta condiciones marinas a diferencia de otras aleaciones que no son capaces de resistir bien los efectos destructivos del océano [12].

En la Figura 2 se muestra el bronce naval usado en diferentes aplicaciones.



Figura 2. Bronce AB2/naval, [13].

- **Aplicaciones**

Entre algunas de sus aplicaciones se encuentran [14]:

- Sistemas hidráulicos: cilindros, soportes, entre otros.
- Condensadores.
- Intercambiadores de calor.
- Embarcaciones de carga.
- En cruceros.

- **Propiedades**

- Alta Resistencia: En contacto con los entornos marinos, agrietamientos por corrosión bajo tensión, fatiga y desgaste [14].
- Alta ductilidad: Presenta buena capacidad para deformarse plásticamente sin romperse [14].

- Resistencia al desgaste: Soporta fricción manteniendo su integridad ante un roce constante [14].
- Resistencia a la corrosión: Soporta agentes químicos o ambientes agresivos [14].
- Amigable con el medio ambiente: Es un material sólido que no se deteriora [14].

1.2.1. Composición química bronce naval

La Tabla 2 muestra los elementos químicos del bronce naval AB2.

Tabla 2. Composición química del bronce AB2, [15], [16].

Composición química (%)	
Bronce AB2	
Cobre (Cu)	Rem.
Aluminio (Al)	8.80 – 10
Níquel (Ni)	4.00 – 5.50
Manganeso (Mn)	3.00 máx.
Estaño (Sn)	0.10 máx.
Zinc (Zn)	0.50 máx.
Plomo (Pb)	0.05 máx.
Hierro (Fe)	4.8
Silicio (Si)	0.10 máx.
Total, Imps	0.30

1.3 Propiedades mecánicas de las aleaciones

Conocer las propiedades mecánicas del bronce permite evaluar su resistencia y comportamiento ante esfuerzos, garantizando una adecuada selección del material.

1.3.1. Bronce fosfórico SAE40

En la Tabla 3 se muestran las propiedades mecánicas del bronce SAE40.

Tabla 3. Propiedades mecánicas bronce SAE40, [17], [18].

Bronce SAE 40	
UNS N°	C83600
Límite de resistencia a la tracción [MPa]	300
Límite de fluencia [MPa]	98
Alargamiento mínimo “50, 80 mm” [%]	20
Dureza Brinell [HB]	75
Densidad [kg/m^3]	8750 – 8850
Módulo de Young [MPa]	79000 – 82000
Rigidez específica [Nm/kg]	8.97 – 9.33
Límite elástico [MPa]	110 – 140
Resistencia a la compresión [MPa]	110 – 140
Coefficiente de Poisson	0.34 – 0.35
Resistencia a la fractura [$MPa * m^{0.5}$]	65.5 – 73.1
Tenacidad [kJ/m^2]	53.4 – 66.3
Módulo de corte [MPa]	29000 - 30000

1.3.2. *Bronce naval AB2*

En la Tabla 4 se presentan las propiedades mecánicas del bronce naval AB2.

Tabla 4. Propiedades mecánicas bronce AB2, [15].

Bronce Bronce Naval AB2	
UNS N°	C95800
Elongación [%]	15
Límite de resistencia a la tracción [MPa]	640
Dureza Brinell [HB]	170
Densidad [kg/m^3]	7600 – 7680
Módulo de Young [MPa]	110000 – 117000

Rigidez específica [Nm/kg]	14.4 – 15.3
Límite elástico [MPa]	240 – 275
Resistencia a la compresión [MPa]	240 – 275
Coefficiente de Poisson	0.32 – 0.34
Resistencia a la fractura [$MPa * m^{0.5}$]	37 – 45
Tenacidad [kJ/m^2]	12.1 – 17.7
Módulo de corte [MPa]	42000
Resistencia al corte [MPa]	410 - 507

1.4 ISO 7800

Esta norma internacional describe un método para evaluar como los alambres con diámetros comprendidos entre 0,1 mm a 14 mm, resisten la deformación plástica al ser torcidos en una sola dirección [19].

1.4.1. Condiciones de prueba

Idealmente la prueba se debe llevar a cabo a una temperatura entre 10 °C y 35 °C. Y para ensayos que se realizan bajo condiciones controladas, de ser necesario, deben realizarse a una temperatura de (23 +/- 5 °C) [20].

1.4.2. Tubos de ensayo

- La longitud de la pieza de prueba que se utilizará debe estar o ser lo más recta posible, de ser necesario usar un método adecuado para enderezar la pieza [19].
- Durante el enderezado, no debe ser modificada o alterada la superficie del alambre ni retorcer la probeta [19].

En la Tabla 5 se especifican las velocidades nominales para diámetros indicados de ensayos, para acero, cobre, aleaciones de aluminio, entre otros.

Tabla 5. Velocidad nominal de ensayo par alambres redondos y perfilados, [19].

Diámetro (d) o dimensión característica (D), [mm]	Acero $\frac{rev}{s}$	Cobre y aleaciones de cobre $\frac{rev}{s}$	Aluminio y aleaciones de aluminio $\frac{rev}{s}$
$0,1 \leq d(D) \leq 1$	1	5	
$1 \leq d(D) \leq 1.5$		2	
$1.5 \leq d(D) \leq 3$	0.5	1.5	1
$3 \leq d(D) \leq 3.6$		1	
$3.6 \leq d(D) \leq 5$	0.25	0.5	
$5 \leq d(D) \leq 10$			

1.5 Equipo para ensayo a torsión

La máquina para pruebas de torsión unidireccionales y bidireccional ($\phi 5 \leq d \leq \phi 10$) cuenta con una pantalla táctil LCD, un gran par, una alta estabilidad y precisión de control [21].

El ensayo se realizó en la máquina permite determinar la capacidad del material para soportar deformación plástica en torsión y observar defectos internos y superficiales del material [21].

Tipos de torsión:

- Unidireccional: La muestra gira uniformemente alrededor de su eje 360° en una dirección, pero un número específico de veces, o bien, llega a romperse [21].
- Bidireccional: La muestra gira de manera uniforme alrededor de su eje 360° en una dirección un número específico de veces y luego gira en la dirección opuesta y el mismo número de veces, o bien, llega a romperse [21].

1.5.1. Parámetros técnicos

En la Tabla 6 se detallan diferentes parámetros técnicos del equipo de torsión.

Tabla 6. Parámetros técnicos, [21].

Modelo	Hez-10
Rango de sujeción (mm)	1.0 – 10.0
Longitud de calibre entre dos mandriles (mm)	500
Velocidad de torsión (r/min)	15-120 r/min (Cambio de vel. continuo)
Error de velocidad	±5%
Resolución de la revolución (rev)	0.1
Coaxialidad de los dos mandriles (mm)	0.4
Paralelismo del carril móvil (mm)	0.2
Dureza de la mandíbula (HRC)	5565
Dimensiones (mm)	1350 x 420 x 1300
Peso (kg)	200
Fuente de alimentación	CA 220 V ±10% 50Hz
Ruido	70 dB (A)

1.5.2. Condiciones de trabajo

- Rango de temperatura: ambiente de 20 ± 10 , la humedad relativa de $\leq 80\%$.
- Colocado sobre una base sólida.
- Entorno limpio, sin vibraciones, medios corrosivos o interferencias electromagnéticas.

1.6 Calidad de la superficie del objeto

La calidad de la superficie de los objetos determina el nivel de precisión alcanzado, influyendo en su durabilidad, funcionamiento y aspecto final.

1.6.1. Acabado superficial

Las superficies exteriores de las piezas son el punto de contacto con otras partes dentro de los mecanismos y su calidad o acabado superficial puede marcar la diferencia en su funcionamiento, en la eficiencia y durabilidad de la máquina.

Un acabado superficial adecuado no solo mejora el rendimiento, sino que da un buen punto de vista estético, siendo una de las cosas claves para llamar la atención de las industrias en el mercado.

Como el acabado representa un costo significativo en la producción, elegir los métodos adecuados para un resultado final óptimo y que cumpla con los requisitos funcionales es crucial, por eso, en el sector industrial los diseñadores necesitan conocer los sistemas y técnicas de acabado para asegurar que cada pieza cumpla su propósito. Es importante realizar un estudio de los tipos de acabado superficiales, ya que, conecta el diseño, la funcionalidad y el proceso de fabricación [22][23].

1.6.2. Rugosidad

La rugosidad de una superficie se define como las pequeñas irregularidades o asperezas influenciadas por la composición del material y el tipo de acabado. Por ejemplo, para piezas que necesitan un acabado suave y estético se recomienda una rugosidad baja, en cambio para reducir la fricción en ciertas máquinas es ideal una rugosidad más alta ayudando a disminuir el desgaste o la corrosión [24][25].

Una categorización de la rugosidad se basa en la inspección de la superficie a dos escalas distintas [26], como:

- Escala intermedia: Tiene grados escalonados, ondulados y planos.
- Escala pequeña: Divide los grados de la escala intermedia en pulida, rugosa y lisa.

En la Figura 3 se muestra la escala de observación aplicada en la determinación de la rugosidad superficial.

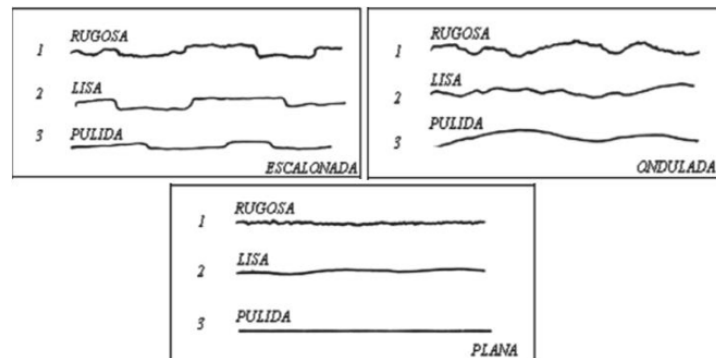


Figura 3. Escala de observación para evaluar la rugosidad, [26].

En la industria el control adecuado de la rugosidad es clave para asegurar que las piezas metálicas duren más y funcionen bien, se dan casos en los que superficies demasiado ásperas pueden generar calor y desgaste al rozamiento con otros componentes reduciendo la vida útil de las máquinas. Por eso se usan herramientas como rugosímetros o perfilómetros para una medición precisa de estas irregularidades, garantizando un equilibrio que permita buena lubricación, menos desgaste y ajuste perfecto entre componentes [25].

Piezas que a simple vista parecen lisas presentan pequeñas rugosidades, al ser observadas muy de cerca que estas superficies no son tan uniformes como parecen, con aumento se puede notar una textura irregular que varía según el grado de rugosidad. La Figura 4 muestra como diferentes objetos presentan estas imperfecciones observado que en realidad sus superficies presentan irregularidades [24].

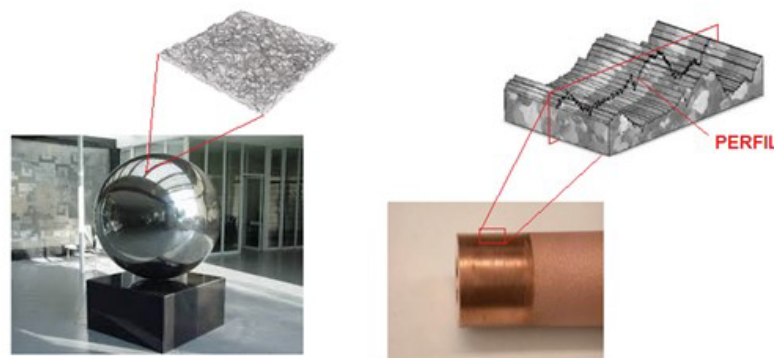


Figura 4. Objetos con diferentes rugosidades, [24].

Existen diferentes tipos y rangos de rugosidades que se presentan al mecanizar la pieza de trabajo. En la Tabla 7 se detallan los rangos y tipos de rugosidades que se pueden alcanzar.

Tabla 7. Categorización de rugosidades, [27].

R_a (μm)	Nº calidad	Estado superficial aprox.
50	N12	Rugoso
25	N11	
12.5	N10	
6.3	N9	Marcas visibles y apreciables al tacto, desbastado.
3.2	N8	
1.6	N7	Marcas visibles, fino.
0.8	N6	
0.4	N5	Marcas no visibles ni apreciables al tacto, muy fino.
0.2	N4	
0.1	N3	
0.05	N2	Superfino, marcas no visibles
0.025	N1	

1.6.3. Parámetros de las texturas superficiales

Al describir los perfiles de las superficies bajo las normas internacionales existen parámetros superficiales desarrollados como respuesta para las complejidades de las superficies que han sido utilizados en muchos estudios. Gran parte de los parámetros se detallan en la norma ISO 13565-2:1997 “Surface texture: Profil method”.

En la Tabla 8 se presenta un resumen de parámetros aritméticos en una textura superficial [25].

Tabla 8. Resumen de los parámetros aritméticos, [25].

Parámetros de amplitud	
Ra "rugosidad media aritmética"	Mide cuanto varía la superficie respecto a una línea central imaginaria.
Rt "altura máx. Entre picos y valles"	Mide el rango de distancia entre el pico más elevado y el valle más profundo.
Zi "rugosidad parcial"	Promedia las alturas de rugosidad en secciones específicas.
Rz "altura media de pico a valle"	Promedio de los valores parciales de rugosidad.
Rq "media cuadrática o rms"	Se suman los valores de rugosidad, se las eleva al cuadrado y se aplica la raíz cuadrada.
Rp "valor del pico más alto medido desde la línea media"	Medida del punto más alto tomado desde la línea central
Rpm "profundidad media de nivelación"	Promedio de los puntos más altos.
Rv "valor del valle más profundo debajo de la línea cetral"	Medida del punto más bajo tomado desde la línea central.
Parámetros de espaciado	
Sm "distancia media de las asperezas"	Magnitud calculada por la distancia entre picos sucesivos.
M "cantidad de picos"	Número de crestas por unidad de longitud.
n "número de intersecciones"	Acercamiento aproximado a la forma de las crestas.

1.6.4. Factores de mecanizado

Las variables dependientes e independientes son factores que tienen influencia en el resultado final de la muestra mecanizada [26].

En la Tabla 9 se especifican las definiciones de las variables independientes, en las que el operador tiene la total libertad de configurar el proceso de mecanizado más adecuado.

Tabla 9. Descripción de las variables independientes, [28].

Variables Independientes	Definición
Material y recubrimiento de la herramienta	Elegir el material y recubrimiento adecuado para la herramienta asegura un corte eficiente y duradero.
Geometría y filo de la herramienta	Los ángulos y el acabado de la herramienta se ajustan para un mecanizado preciso.
Material y estado de la pieza de trabajo	La composición de la pieza determina cómo interactúa con la herramienta durante el corte.
Avance, velocidad y profundidad de corte	Son parámetros para la calidad del mecanizado y la vida útil de la herramienta.
Fluidos de corte	Un fluido mejora el rendimiento y previene fallos para la producción.
Características de la máquina herramienta	La potencia y velocidad del equipo deben cumplir exigencias del proceso.

En la Tabla 10 se especifican las variables dependientes, es decir, factores que son el resultado del acoplamiento de las variables.

Tabla 10. Definición de las variables dependientes, [28].

Variables Dependientes	Definición
Tipo de viruta producida	La viruta continua, aserrada o discontinua revela como el material reacciona al corte.
Fuerza de corte y energía implicada	Ajustar velocidad o fluido mejoran la eficiencia.
Temperatura	La fricción calienta pieza, herramienta y viruta acortando la vida útil de la herramienta.
Acabado superficial	Superficies lisas mejoran rendimiento y estética. Rugosidad alta genera irregularidades.

1.7 Fórmulas de los parámetros de rugosidad

- Rugosidad Promedio “ R_a ”

La Figura 5 se muestra la representación gráfica de la rugosidad promedio.

Con la ecuación 1 se obtiene R_a .

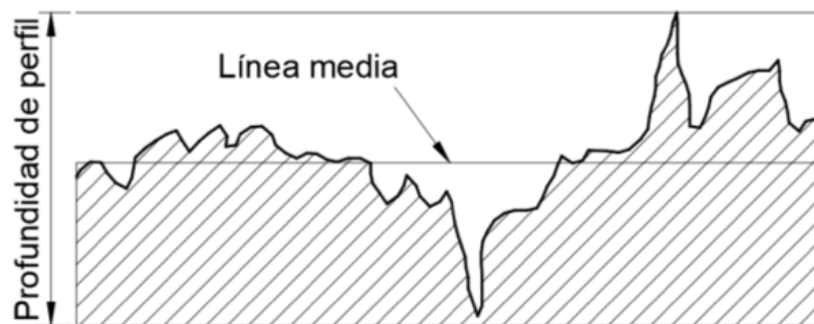


Figura 5. Rugosidad promedio. [29].

$$R_a = \frac{1}{n} \int_{x=0}^{x=L} |y| dx \quad (1)$$

Donde:

L: Longitud de estudio

y: Ordenada desde la línea central

- Profundidad media de rugosidad en μm

En la Figura 6 se observa la representación de los parámetros de rugosidad.

Con la ecuación 2 se obtiene la profundidad media de rugosidad.

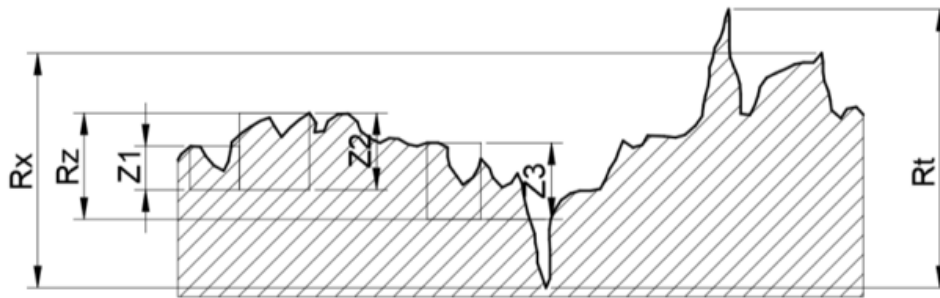


Figura 6. Parámetros de rugosidad, [30].

$$R_z = \frac{Z_1 + Z_2 + Z_3}{3} \quad (2)$$

Donde:

R_z : Profundidad de rugosidad máxima [μm]

R_{max} : Profundidad de individual máxima individual [μm]

- La rugosidad se calcula matemáticamente usando la ecuación 3 [31]:

$$R_a = \frac{125 \cdot f^2}{R} \quad (3)$$

Donde:

R_a : Rugosidad superficial en μm

f : Avance de la herramienta en mm/rev

R : Radio de la punta de la herramienta en [mm]

1.8 Equipo para medir la rugosidad

Luego de la etapa de mecanizado con el avance adecuado de cada probeta, se realizó la medición de la rugosidad de cada acabado superficial de las muestras. El equipo utilizado para registrar las medidas de R_a , fue un rugosímetro Mitutoyo SJ-210 el cuál cuenta con un palpador

de diamante que es capaz de recorrer una longitud de 5 mm durante la superficie mecanizada y debe colocar perpendicular a la superficie a medir [27].

Al registrar las mediciones se debe tener en cuenta que se debe realizar tres mediciones, girando 120 ° horarios o antihorario desde la primera medición realizada según las recomendaciones de Machining Data Book [27].

La Tabla 11 detalla los parámetros del equipo.

Tabla 11. Especificaciones del rugosímetro, [32].

Mitutoyo SJ-210	
Pantalla	Digital
Rango de medición X	17.5 [mm]
Rango de medición Z	360 [μm] (-200 μm -+160 μm)
Velocidad de seguimiento de medición	(0.25 – 0.5 – 0.75) [mm/s]
Radio de punta	5 [μm]
Rango mínimo/resolución	(25 μm /0.002 μm)

En la Figura 7 y Figura 8 se visualiza el equipo que dispone la Universidad para medir la rugosidad.



Figura 7. Equipo Mitutoyo SJ-210.



Figura 8. Equipo Mitutoyo SJ-210.

1.9 Torno

El torno es una máquina herramienta diseñada para arrancar viruta de un material, en este caso la pieza de trabajo gira en su propio eje y la herramienta generalmente fabricada en aceros rápidos (HSS) o carburos metálicos de corte se desplaza hacia la pieza. Estos movimientos combinados permiten moldear, cortar o dar forma a diferentes materiales de manera precisa y eficiente [33], [34].

Los movimientos del útil de corte están relacionados a movimientos específicos:

- Cilindrado: Movimiento paralelo al eje rotacional del material [34].
- Refrentado: Movimiento transversal al eje de rotación [34].

Entre los trabajos más comunes de un torno se encuentran:

- Cilindrado y cilindrado cónico.
- Roscado.
- Refrentado.

1.10 Materiales para herramientas de corte

- **HSS**

Es un acero de alta velocidad perfecto para cortes interrumpidos o para herramientas con formas complejas como brocas, machuelos, fresas, etc. Muy usado en el torneado pero su limitación

está en que las velocidades de corte son bajas a diferencia de herramientas de metal duro (carburo) [35].

- **Metales Duros**

Este material presenta una elevada dureza en caliente, así como, un módulo elástico alto es decir baja deformación y alta dureza térmica [35].

El tamaño del grano del WC es un factor importante, mientras el grano sea fino mayor será la dureza [35].

Existen dos tipos:

- Metales duros sin recubrimiento

Usado para mecanizado de superaleaciones termorresistentes, aleaciones de titanio y materiales torneados a baja velocidad[35].

- Metales duros con recubrimiento

Presentan una relación de resistencia al desgaste y tenacidad, su recubrimiento de CVD o PVD es tomando en cuenta en diferentes herramientas y aplicaciones [35].

- **Cermets (HT)**

Presenta una mayor resistencia a comparación del metal duro por lo que es usado en acabados y semiterminados en aceros de bajo carbono, inoxidable, buen acabado superficial y donde se requiera avances y profundidades de corte reducidas [35].

- **Cerámica**

Presentan excelente resistencia al desgaste y al calor en elevadas velocidades de corte, pero baja tenacidad mala para desbaste con gran profundidad de corte [35].

- **Diamante policristalino (DP)**

Es el más resistente a la abrasión y buena resistencia al desgaste por lo que es el material más duro que existe, pero su estabilidad química a elevadas temperaturas no es buena y se disuelve con el hierro fácilmente. Además, no es adecuado para materiales ferrosos. [35].

- **Nitruro de boro cúbico (CBN)**

El CBN es el más duro después del diamante, y presenta una excelente resistencia térmica y buena tenacidad para velocidad de corte elevadas. Adecuado para materiales con dureza superior a 45 HRC [35].

- **Geometría de las herramientas**

Cada herramienta de corte tiene propiedades geométricas específicas que se adaptan a distintos procesos de mecanizado.

Se dividen en dos grandes categorías:

- De muchos filos cortantes: brocas, escariador, fresas [36].
- De punta: empleados en procesos de mecanizado en torno [36].

Entre los principales ángulos de cuchillas de acero de alta velocidad se encuentran:

- Radio de punta (r): Afecta el acabado superficial y la resistencia.

El radio de punta y el avance son los factores que deciden el ancho y profundidad de los picos presentes en la pieza al ser mecanizada [37]. En la Figura 9 se visualizan los factores.

Un radio muy pequeño deja un mal acabado y un ángulo muy grande genera vibraciones [38].

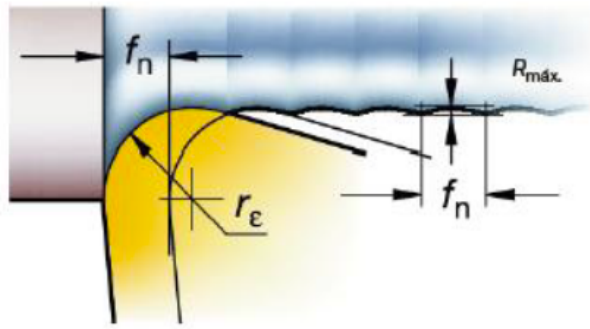


Figura 9. Rugosidad en función del avance y radio de punta, [37].

- Ángulo de punta (ϵ): Es el ángulo resultante de la formación de cada filo de la plaquita y se ubica al centro para lograr una punta equilibrada y facilitar el desprendimiento de la viruta [38].
- Ángulo de ataque (γ): Controla la dirección de la salida de viruta, su rango ideal de trabajo va de -5° a 30° . [38]
- Ángulo de depulso (α): Permite que la herramienta no roce con el material. A mayor ángulo la punta puede astillarse y a menor ángulo la herramienta se desgasta rápido [38].

En la Figura 10 se indica los principales ángulos en la herramienta de torno.

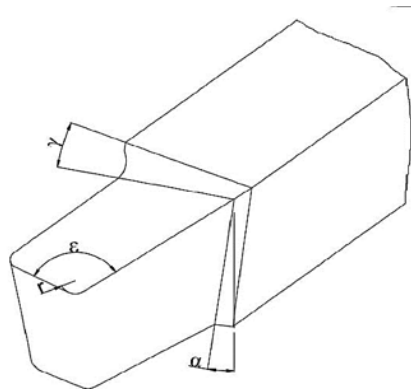


Figura 10. Ángulos de la herramienta, [34].

1.10.1. Forma y características de la plaquita

La geometría de la plaquita se divide en positivas y negativas, esenciales y tomadas muy en cuenta el momento de su selección [37].

En la Tabla 12 se detallan características de cada tipo de plaquitas.

Tabla 12. Características de las plaquitas para torneado, [37].

Plaquetas Negativas	Plaquetas Positivas
Doble o una cara	Una sola cara
Filo de alta resistencia	Baja fuerza de corte
Incidencia cero	Incidencia lateral
Condiciones pesadas de mecanizado	Primera elección para torneado de piezas delgadas ya sea exterior o interior.
Mejor elección para torneado exterior	

En la Figura 11 se detalla la forma de la plaquita, en donde se tiene en cuenta el ángulo de punta. Un ángulo de punta mayor exige más potencia de la máquina y presenta más vibración, pero la resistencia y fiabilidad también será más alta [37].

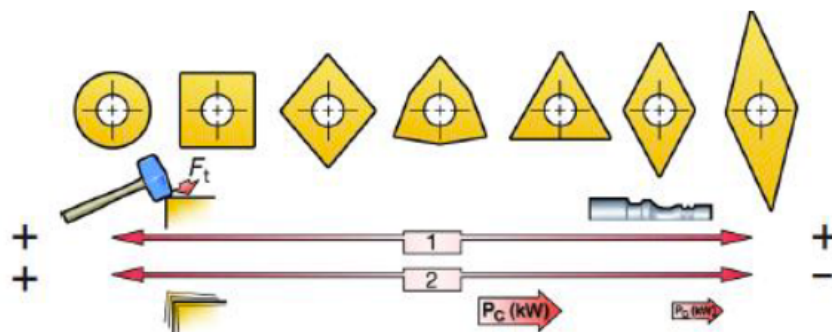


Figura 11. Plaquetas de diversas geometrías, [37].

1.11 Cuchilla de cilindrado

Las cuchillas pueden ser derechas o izquierdas, según el lado donde comienza el mecanizado.

En la Figura 12 se muestra un cilindrado con los sentidos de la pieza y la herramienta.

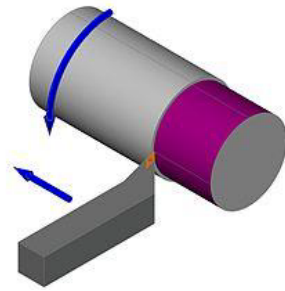


Figura 12. Cilindrado, [29].

En la Figura 13 se visualiza la forma que posee la cuchilla de cilindrado.

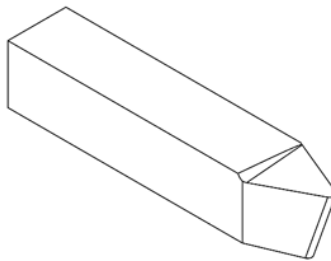


Figura 13. Cuchilla de cilindrado, [29].

En la Figura 14 se detalla el radio y ángulo de punta de una herramienta de cilindrado.

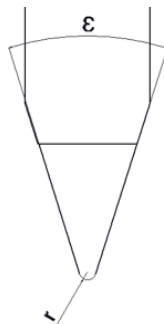


Figura 14. Radio y ángulo de punta de la cuchilla de cilindrado [29].

En la Figura 15 se detalla el ángulo de despulpo y ataque de una cuchilla de cilindrado.

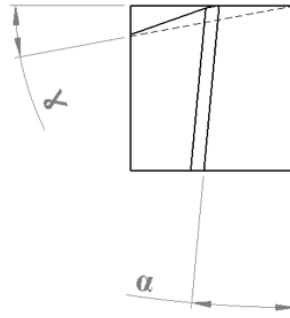


Figura 15. Ángulo de despullo y ataque de la cuchilla de cilindrado [29].

1.11.1. Cuchilla de refrentado

Las cuchillas de refrentado poseen baja resistencia porque termina en punta y tiende a desgastarse.

En la Figura 16 se muestra el movimiento de la pieza y la herramienta en la operación de refrentado.

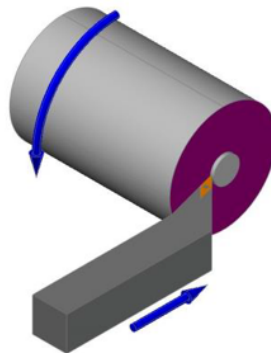


Figura 16. Refrentado, [29].

En la Figura 17 se visualiza la forma que posee la cuchilla de refrentado.

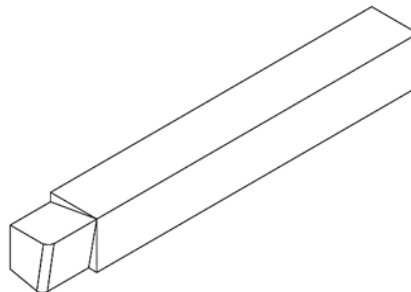


Figura 17. Cuchilla de refrentado, [29].

En la Figura 18 se detalla el radio y ángulo de punta de una herramienta de refrentado.

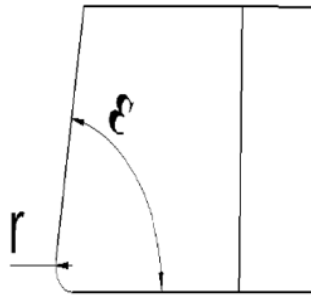


Figura 18. Cuchilla de refrentado, radio y ángulo de punta, [29].

En la Figura 19 se detalla el ángulo de despullo y ataque de una cuchilla de refrentado.

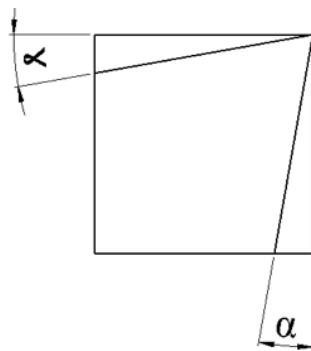


Figura 19. Ángulo de despullo y ataque de la cuchilla de refrentado, [29].

1.12 Torno convencional

Es una máquina herramienta que es operada de forma manual, y es muy flexible lo que la hace adecuada para baja y mediana producción [26]. En la Figura 20 se muestran la imagen de un torno convencional con sus partes principales.

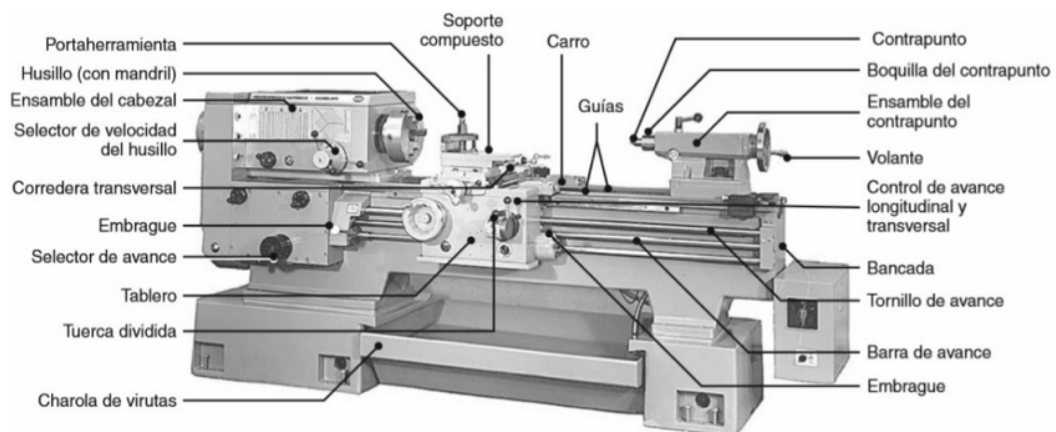


Figura 20. Torno convencional y sus partes principales, [39].

1.13 Tornos CNC

Las máquinas herramientas actuales y más avanzadas usan controles numéricos computarizados o conocidos también como CNC, se diseñaron para optimizar el uso de herramientas de corte permitiendo realizar múltiples operaciones con la flexibilidad de intercambiarlas automáticamente gracias a su cambio automático de herramientas [39].

Además, en comparación a los tornos convencionales, los tornos CNC presentan una mayor potencia y rapidez al momento de realizar las operaciones de trabajo [39].

En la Figura 21 se muestra el torno EMOCOMAT E-200 utilizado y que la Universidad Politécnica Salesiana dispone.



Figura 21. Torno EMOCOMAT E-200, [40].

El torno CNC que se utilizará es el EMOCOMAT E-200 y en la Tabla 13 se especifican sus datos técnicos.

Tabla 13. Torno EMOCOMAT E-200, datos técnicos, [41].

EMCOMAT E-200	
Ámbitos de trabajo	
Distancia entre sus puntos	1000 [mm]
Altura de puntos	200 [mm]

Ø del perímetro sobre el lecho	400 [mm]
Ø del perímetro sobre el carro transversal	220 [mm]
Recorrido carro transversal	220 [mm]
Ancho del carro transversal	150 [mm]
Herramienta torno - sección transversal	20 x 20 [mm]

Accionamiento principal

Motor trifásico - C.A., regulable sin fases, potencia en 100%/40% E.D.	7.5/10 [kW]
Husillo principal – Torque nominal max.	180 [Nm]

Avances

Área de avance eje X/Z-	0 – 8000 [mm/min]
Fuerza de avance max. X	4 [kN]
Fuerza de avance max. Z	4 [kN]

El husillo presenta diferentes rangos de velocidades que se especifican en la Tabla 14.

Tabla 14. Rangos de velocidad del husillo, [41].

Husillo Principal	
Revoluciones del husillo	0 – 4000 [rpm]
Regulación de la velocidad	Sin fases

1.14 Mecanizado en seco

El mecanizado de alta velocidad en seco ofrece beneficios económicos al eliminar fluidos de corte, reduciendo costos y problemas ambientales, sin embargo, presenta limitaciones como el desgaste rápido de herramientas debido al calor, requiriendo recubrimientos avanzados y materiales resistentes [39].

Otra limitación es la vibración por eso se necesita máquinas herramientas con programas CNC que optimicen los parámetros para evitar dichas limitaciones, además, la viruta generada tiene mayor valor de mercado si contiene menos del 2% de refrigerante, lo que evita costos adicionales [39].

1.15 Parámetros de corte

Los parámetros de corte permiten controlar las condiciones del mecanizado, definiendo la velocidad, el avance y la profundidad, ya que, influyen en la calidad y costo del proceso.

1.15.1. Velocidad de corte (V_c)

La velocidad de corte en un torno se define como la distancia recorrida en metros, en un minuto, y se calcula mediante la ecuación 4 [42]:

$$V_c = \frac{\pi \cdot D \cdot n}{1000} \left[\frac{m}{min} \right] \quad (4)$$

Donde:

- n = Velocidad de rotación de la herramienta (husillo). [rev/min]
- D = Diámetro exterior de la herramienta.
- 1000 = Factor de conversión.

La Tabla 15 detalla efectos presentados por la modificación de la velocidad de corte.

Tabla 15. Efectos de la velocidad de corte, [39][43].

Demasiado alta	Demasiado baja
Rápido desgaste en incidencia	Filo de aportación
Acabado deficiente	Poco económico
Rápida formación de cráteres	
Deformación plástica	

1.15.2. Velocidad de avance (V_f)

La velocidad de avance es un factor clave para lograr un acabado superficial de calidad y mide cuánto se desplaza la herramienta de corte por cada vuelta a lo largo del material. Se calcula con la ecuación 5 [42][39].

$$V_f = f_n \cdot n \quad (5)$$

Donde:

- f_n = avance [mm/rev]
- n = velocidad de husillo [rpm]

Y los rpm del husillo se puede calcular con la ecuación 6:

$$n = \frac{V_c \cdot 1000}{\pi \cdot D_m} \left[\frac{rev}{min} \right] \quad (6)$$

Donde:

- D_m = diámetro de mecanizado [mm]

Asimismo, el f_n también se puede despejar de la ecuación 7 [44]:

$$t = \frac{Lm}{f_n \cdot n} \quad (7)$$

Donde:

- t = tiempo de mecanizado [min]

- Lm = longitud de corte [mm]
- fn = avance [mm/rev]
- n = revoluciones por minuto [rpm]

La Tabla 16 presenta algunos efectos por el cambio de la velocidad de avance.

Tabla 16. Efectos por la velocidad de avance, [39].

Demasiado alta	Demasiado baja
Pérdida de control de la viruta	Viruta fibrosa
Acabado superficial deficiente	Poco económico
Caracterización, deformación plástica	
Elevado consumo de potencia	
Soldadura de las virutas	
Martillado de las virutas	

1.16 Torsión

La torsión se refiere al giro de la sección transversal de un elemento cuando actúan sobre él cargas o fuerzas que generan un momento torsor en torno a su eje longitudinal, con un extremo fijo y sometida a dos pares de torsión T_1 y T_2 , como se muestra en la Figura 22 [45][46].

El momento de un par de fuerzas es la multiplicación de cada fuerza por la distancia correspondiente entre sus líneas de acción, así que, $T_1 = P_1 \cdot d_1$ y $T_2 = P_2 \cdot d_2$. Los pares de fuerzas de T_1 y T_2 producen un torsamiento en la barra conocido como momentos torsionales, torques o pares de torsión [47].

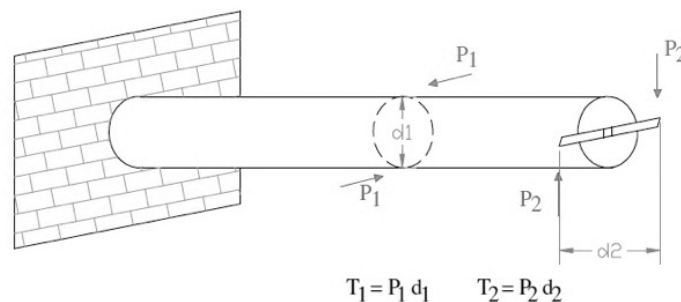


Figura 22. Barra donde actúan 2 pares de torsión, [47].

Las propiedades mecánicas de un material se dan por la relación entre su distorsión ante una carga aplicada. Por lo que, ensayos a torsión en la industria ayudan a conocer propiedades mecánicas y constantes elásticas reales de cada material [45].

1.16.1. Torsión en una sección circular

Elementos de máquinas como las barras cilíndricas por medio de su contacto transmiten movimiento circular entre sus dos ejes. Al aplicar una fuerza en su extremo móvil, la cantidad de vueltas con respecto al otro extremo es una medida de torsión.

Los materiales usados en la ingeniería para fabricar partes de máquinas rotativas, por ejemplo, cigüeñales y árboles de motor, deben ser capaces de soportar las fuerzas de torsión generadas por las cargas que los hacen funcionar [45].

En un eje circular donde uno de los extremos permanecerá fijo y el otro extremo se torcerá, provocará un cambio en el elemento formando un ángulo, llamado ángulo de giro [48].

En la Figura 23 se muestra la línea inicial y la que se forma luego de la torsión con su respectivo ángulo de giro.

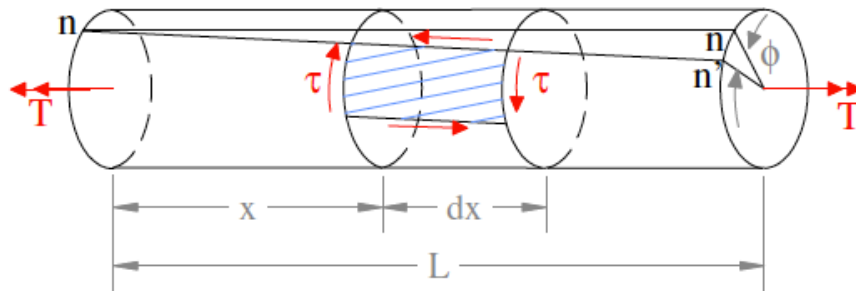


Figura 23. Barra circular sometida a torsión y su ángulo de giro, [47].

El ángulo de torsión φ de un elemento cilíndrico con una longitud “L” sometido a un torque “T”, se calcula con la ecuación 8 [49]:

$$\varphi = \frac{T \cdot L}{G \cdot J} \quad (8)$$

Donde:

- T = par de torsión.
- L = longitud.
- G = módulo de rigidez.
- J = momento polar de inercia.

El módulo de rigidez (G) a través de la Ley de Hooke relaciona los esfuerzos cortantes con las deformaciones angulares [50], que se obtiene con la ecuación 9:

$$\tau = G \cdot \gamma \quad (9)$$

Donde:

- τ = Esfuerzo cortante máximo [Pa ó N/mm^2]
- γ = Deformación angular o ángulo de corte [rad]

El torque o par de torsión dado en [$N \cdot m$] se define como el resultado del producto de la Fuerza por la distancia desde un punto de pivote [51], y se puede calcular con la ecuación 10.

$$T = F \cdot r \quad (10)$$

Donde:

- F = Fuerza tangencial [N]
- r = Radio desde el centro de firo hasta donde se aplica la fuerza [m]

El momento polar de inercia del área de un sólido con sección transversal se obtiene con la ecuación 11 [52][53].

$$J = \frac{\pi \cdot d^4}{32} \quad (11)$$

Y para una sección de sección transversal circular hueca de diámetro interno d_i y de diámetro exterior d_o se usa la ecuación 12:

$$J = \frac{\pi \cdot (d_o^4 - d_i^4)}{32} \quad (12)$$

Ganán y Mullo, muestran el fenómeno de torsión en un eje circular como se detalla en la Figura 24 y Figura 25, dónde se esquematiza cómo se generan las deformaciones por rotación. También menciona que en materiales frágiles esfuerzos de este tipo puede provocar una grieta a 45° en materiales frágiles que no soportan cargas axiales [54].

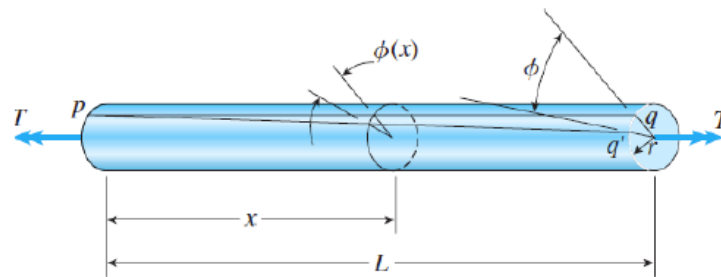


Figura 24. Fenómeno torsional, [54].

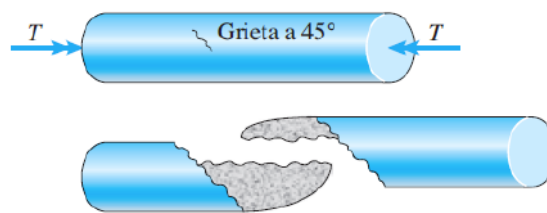


Figura 25. Fenómeno torsional en materiales frágiles, [54].

1.16.2. Rigidez torsional

Se conoce como rigidez torsional a la relación entre el momento torsor de un extremo y al ángulo de giro del mismo con el extremo fijo de una barra recta de sección uniforme. En la Figura 26 se muestra este fenómeno [55].

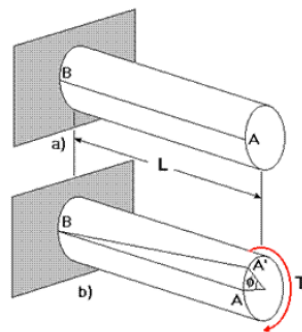


Figura 26. Barra libre sometida a una torsión, [55].

1.16.3. Esfuerzo cortante

Barras de sección circular sometida a torsión presentan cualquier punto de la superficie exterior donde se tendrá un esfuerzo cortante, al cual se denomina cortante puro “ τ ” ya que su esfuerzo no es uniforme porque su valor en el centro del eje es cero hasta alcanzar su valor máximo en el borde exterior. Según la teoría de torsión el esfuerzo cortante máx. es directamente proporcional con el par de torsión aplicado [49].

Con la ecuación 13 se puede determinar de forma práctica el valor del esfuerzo cortante máximo [49].

$$\tau = \frac{T \cdot r}{J} \quad (13)$$

Donde:

- T = par de torsión.
- r = radio.
- J = momento polar de inercia.

1.16.4. Concentrador de esfuerzos

En el libro de Diseño de Máquinas, Robert Norton, explica cómo se distribuyen los esfuerzos dentro de los elementos sometidos a carga, aunque en varios análisis se asume que estos esfuerzos son uniformes en toda la sección transversal, pero en la práctica no es así [49].

Cuando la geometría del elemento presenta muescas, orificios o reducciones de sección los esfuerzos tienden a concentrarse en ciertas zonas [49].

Para representar este fenómeno se usa el factor de concentración de esfuerzos que varía según el tipo de carga ya sea para esfuerzos normales o esfuerzos cortantes [49].

1.16.5. Diagrama esfuerzo – deformación

La forma en que el material se deforma al ser sometido a una carga puede analizarse a través de una curva Esfuerzo-Deformación, mostrada en la Figura 27, que se obtiene mediante ensayos de laboratorio. Dicha curva permite identificar propiedades mecánicas importantes, como la

resistencia y la ductilidad del material, pero el comportamiento del material también puede variar debido a algunos factores como velocidad con la que se aplica la carga o el tipo de equipo utilizado. Por eso es fundamental seguir normas específicas para asegurar resultados confiables y comparables [56].

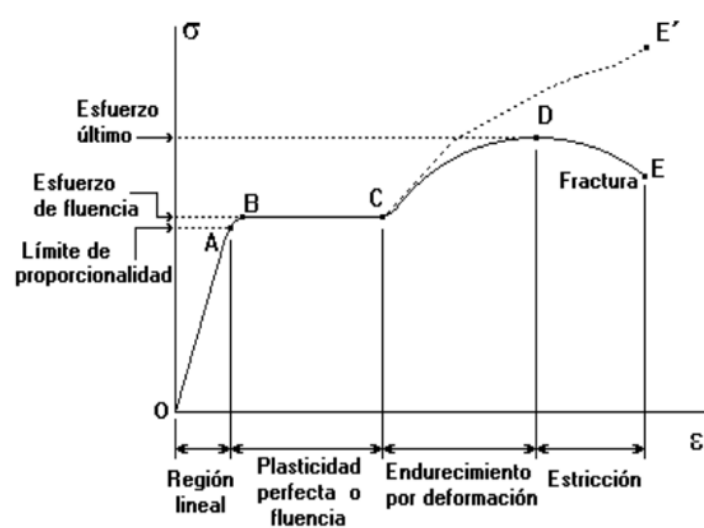


Figura 27. Diagrama esfuerzo-deformación, [56].

1.16.6. Diagrama torque – ángulo de giro

El gráfico que relaciona el torque con el ángulo de torsión permite identificar tanto el módulo de rigidez como el esfuerzo cortante en el punto de fluencia. [53].

En la Figura 28 se muestra el diagrama correspondiente de torque vs ángulo de giro.

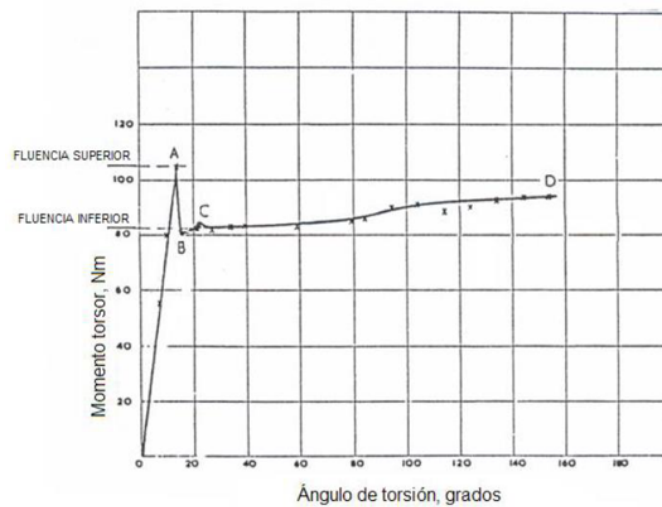


Figura 28. Diagrama momento torsor-ángulo de giro, [56].

CAPÍTULO II

METODOLOGÍA

El Capítulo II expone el enfoque metodológico empleado para el análisis de resultado obtenidos a partir del ensayo a torsión realizado, es decir, se describe el diseño de las probetas en las aleaciones de bronce, el procedimiento experimental aplicado y las circunstancias tomadas en cuenta para las pruebas, considerando las variaciones de factores como velocidad de corte, avance y la clase de inserto utilizado, con el fin de evaluar la rugosidad superficial de cada bronce.

Además, se realiza la recolección de datos, con énfasis en los parámetros de control durante el mecanizado, fundamentales para el análisis estadístico posterior.

2.1 Proceso Metodológico

En la Figura 29 se muestra el flujograma con los pasos y procesos utilizados para realizar el ensayo a torsión y el análisis correspondiente.

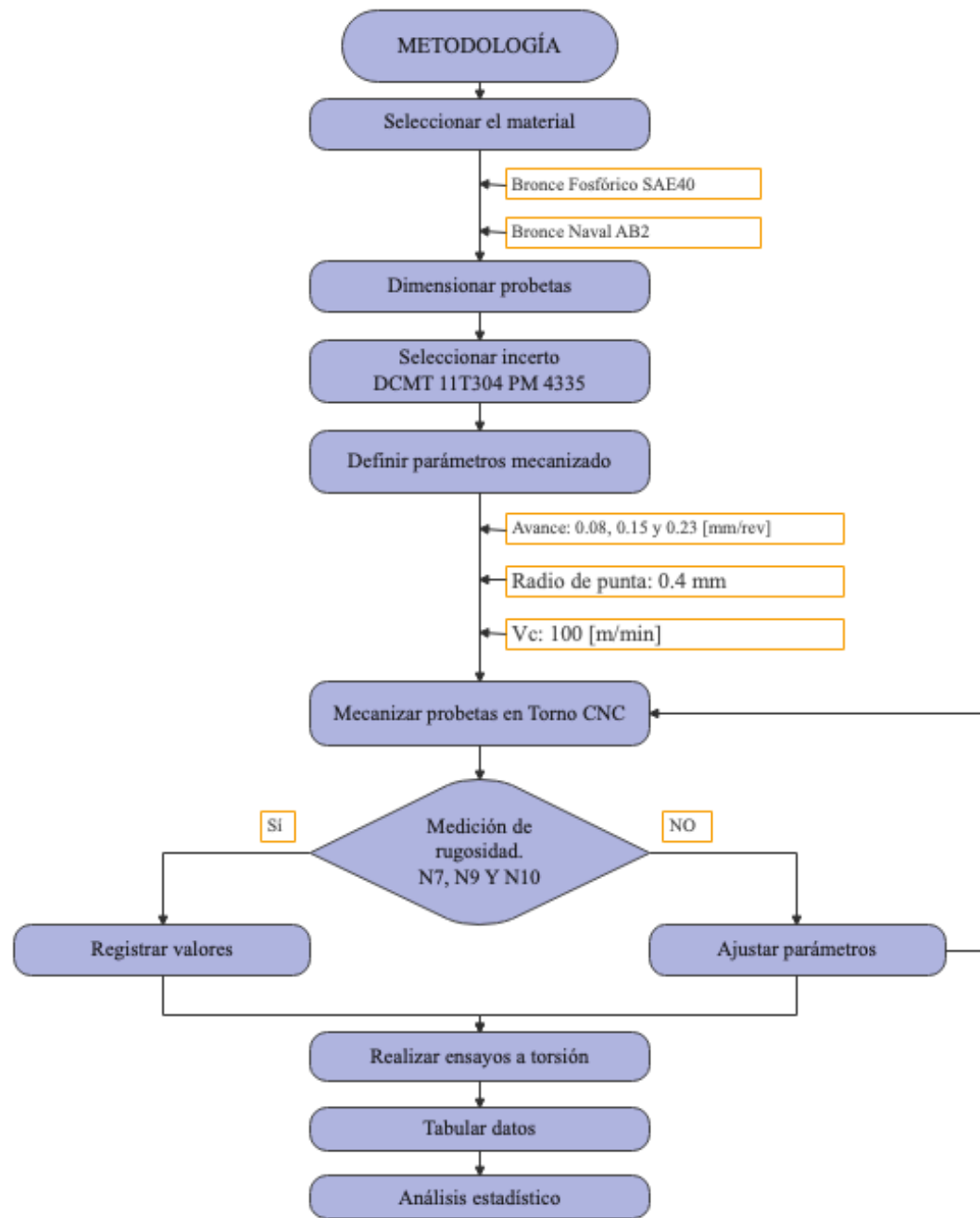


Figura 29. Flujograma de la metodología para el Capítulo II.

2.2 Muestra para ensayo

Se detallan las principales características a tomar en cuenta en la realización de las probetas para el ensayo de torsión.

2.2.1. Forma y tamaño de la muestra

Según el manual de HST GROUP la forma y el tamaño del cabezal deben ser adecuados para la sujeción de la máquina de prueba [57].

Se recomienda usar probetas con un diámetro (d) igual a 10 mm y una longitud de referencia de 50mm y 100mm, así como longitudes paralelas de 70 mm y 120 mm [57].

Al usar diámetros diferentes se debe tomar en cuenta que la longitud paralela será la longitud del calibre más el doble del diámetro [57].

En la Figura 30 se muestra la forma y las dimensiones de la probeta.

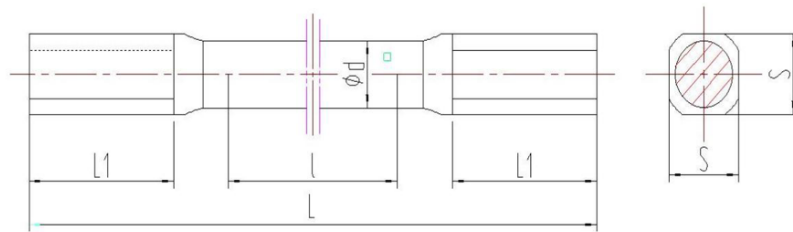


Figura 30. Forma y dimensiones de la muestra, [57].

2.2.2. Dimensionamiento de la muestra

Las probetas correspondientes a ambas aleaciones fueron dimensionadas como se indica en la Figura 31 tomando en cuenta los parámetros adecuados que cumplan con la norma y con el manual dado por los fabricantes. Además, en la Figura 32 se visualiza el modelo en una vista isométrica.

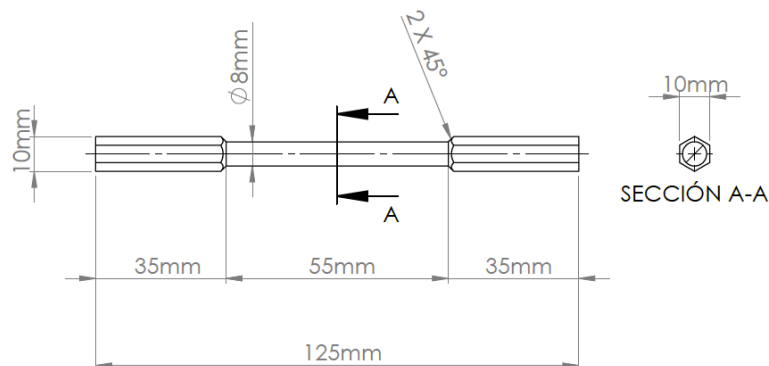


Figura 31. Dimensionamiento de las probetas.

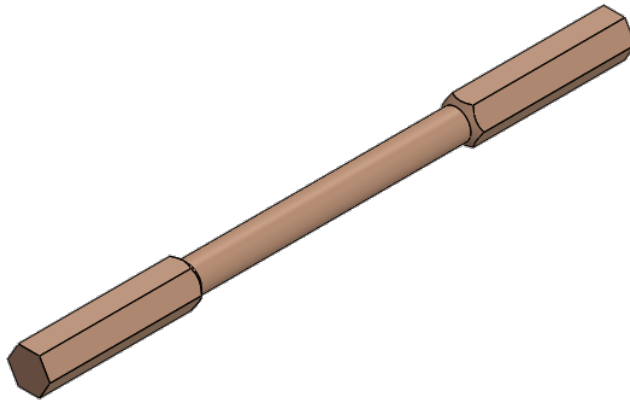


Figura 32. Vista isométrica de la probeta.

2.3 Herramienta de mecanizado

Las herramientas de mecanizado permiten al operador cortar, dar forma o perforar materiales asegurando precisión y eficiencia en el proceso.

2.3.1. Inserto

- Carburo Cementado:

Se eligió el uso de un inserto de carburo cementado o también conocidos como metal duro, ya que, son muy utilizados en herramientas de corte y en otras aplicaciones industriales [58].

Las herramientas de carburo cementado suelen utilizar WC, TiC o TaC como agregado [58].

- Tipo DCMT 11T304 PM 4335:

El inserto seleccionado para el cilindrado de la parte cilíndrica de las probetas es el DCMT 11T304 PM 4335, fabricado por Sandvik Coromant, el cual está hecho de carburo cementado con recubrimiento CVD, compuesto por capas de $\text{TiCN}+\text{Al}_2\text{O}_3+\text{TiN}$, lo que mejora la resistencia al desgaste por flanco, la resistencia a temperaturas altas y también la durabilidad del inserto, además presenta una forma adecuada para el mecanizado de las probetas considerando sus dimensiones [59].

El modelado 3D del inserto DCMT 11T304 PM 4335 de Sandvik se muestra en la Figura 33 y en la Figura 34 se muestra el inserto real para el mecanizado.

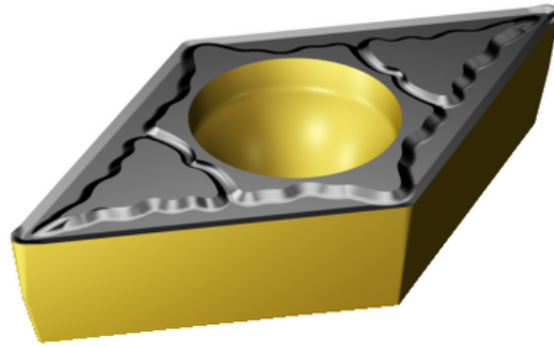


Figura 33. Modelo 3D del inserto, [60].



Figura 34. Inserto DCMT 11T304.

En la Tabla 17 se detallan las condiciones recomendadas por el proveedor para trabajar con el inserto.

Tabla 17. Condiciones de corte recomendadas del inserto, [61].

Parámetros	Valores recomendados
a_p	1.5 mm (0.3 – 3.2)
f_n	0.15 mm/rev (0.08 – 0.23)
h_{ex}	0.15 mm/rev (0.08 – 0.23)
V_c	215 m/min (100 – 330)

En la Tabla 18 se detallan otros parámetros sobre el inserto utilizado.

Tabla 18. Parámetros del inserto DCMT 11T304 PM 4335, [61].

Clasificación del material, Nivel 1 (TMC1ISO).	P M
Denominación de rompe - viruta (CBMD).	PM
Código de modelo de montaje de plaquita (IFS).	Parcialmente cilíndrico, avellanado de 40-60° en uno o dos lados.
Fijación del diámetro del agujero (D1).	4.4 mm
Tamaño y forma de plaquita.	DC11T3
Número de filos (CEDC).	2
Diámetro de círculo inscrito (IC).	9.525 mm
Longitud efectiva del filo (LE).	11.2279mm
Radio de punta (RE).	0.3969
Calidad (Grade).	4335
Sustrato.	HC
Recubrimiento (COATING).	CVD TiCN+Al2O3+TiN
Grosor de plaquita (S).	3.9688 mm
Ángulo de incidencia principal (AN).	7°
Peso del elemento (WT).	0,0037 kg
Alojamiento de plaquita (SSC_M).	11
Tamaño del alojamiento de la plaquita (SSC_N).	3/8

En la Figura 35 se muestra la ilustración de algunos parámetros de la tabla anterior.

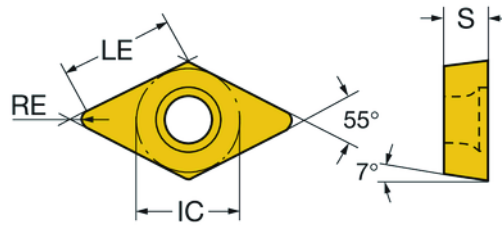


Figura 35. Ilustraciones técnicas del inserto, [60].

2.3.2. Radio de punta

Para evitar fallos al momento de mecanizar se le da un pequeño redondeo a la punta de la herramienta, conocido como radio de punta. Este valor suele variar entre 0.6 y 1.5 mm, según la selección adecuada para un acabado superficial específico [62].

En este caso la lección del radio de punta (RE) del inserto es de 0.4 [mm].

2.3.3. Parámetros de corte para el mecanizado

En la Tabla 19 se detallan los parámetros tomados en cuenta al momento de mecanizar las probetas para obtener el acabado superficial deseado.

Tabla 19. Parámetros para el acabado superficial.

fn [mm/rev]	Radio punta del inserto	Acabado
0.08	0.4	N7
0.15	0.4	N9
0.23	0.4	N10

2.4 Valores para las probetas

Para calcular las revoluciones por minutos que se necesita se utilizó la ecuación (6):

$$n = \frac{100 \cdot 1000}{\pi \cdot 8}$$

$$n = \frac{3978 [RPM]}{60}$$

Los 100 m/min que se utilizó se debe a que las revoluciones por minuto máximas que alcanza el Torno CNC son de 4000 rpm y con velocidad de corte se logró establecer una velocidad del husillo adecuada.

La Tabla 20 detalla los parámetros tomados en cuenta para las probetas y el ensayo de torsión.

Tabla 20. Parámetros seleccionados para realizar las muestras.

Ensayo	f_n [mm/rev]	V_c [m/min]	RE [mm]
1	0.08		
2	0.15	100	0.4
3	0.23		

2.5 Cálculos para la obtención del acabado

El cálculo de Ra se basó en los valores de los parámetros establecidos del inserto que detalla la Tabla 20, y usando la ecuación (3) se obtuvo las rugosidades necesarias:

- Para N7

$$Ra = \frac{125 \cdot (0,08)^2}{0,4}$$

$$Ra = 2 [\mu m]$$

La rugosidad adecuada para N7, ya que su rango va de 1.6 [μm] a 3.2 [μm].

- Para N9

$$Ra = \frac{125 \cdot (0,15)^2}{0,4}$$

$$Ra = 7.03 [\mu m]$$

La rugosidad adecuada para N7, ya que su rango va de 6.3 [μm] a 12.5 [μm].

- Para N10

$$Ra = \frac{125 \cdot (0,23)^2}{0,4}$$

$$Ra = 16.53 [\mu m]$$

La rugosidad adecuada para N7, ya que su rango va de 12.5 $[\mu m]$ a 25 $[\mu m]$.

2.6 Proceso de mecanizado de las probetas

Las Figura 36 y 37 presentan el mecanizado en la fresadora del bronce naval y bronce fosfórico para lograr el hexágono a cada lado de las probetas, obteniendo la geometría para el ajuste correspondiente para los platos de la máquina de torsión.



Figura 36. Fresado hexagonal del bronce naval.



Figura 37. Fresado hexagonal del bronce fosfórico.

En la Figura 38 se muestra la unidad de control CNC del torno de la Universidad Politecnica Salesiana de Quito durante el mecanizado de las probetas.



Figura 38. Unidad de control CNC durante el mecanizado de las probetas.

En la Figura 39 se visualiza el posicionamiento adecuado de la pieza de trabajo para el mecanizado CNC.

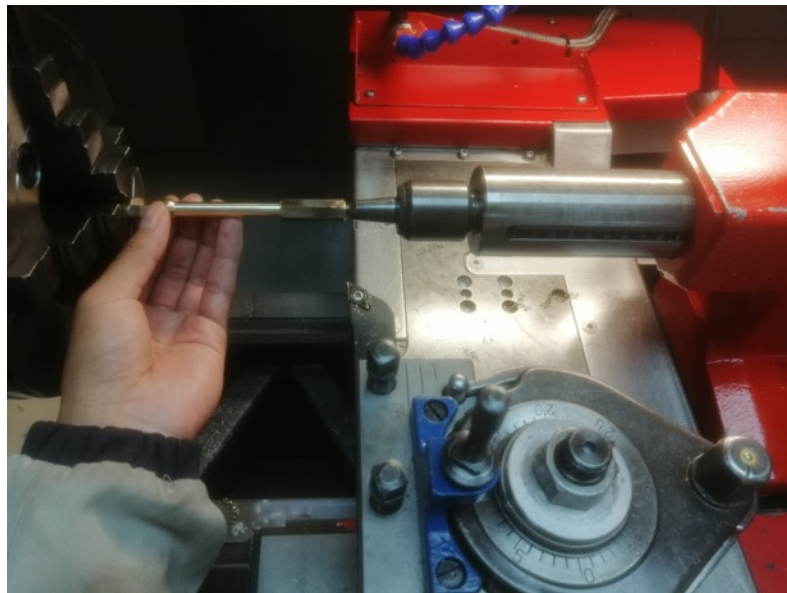


Figura 39. Posicionamiento de las probetas en el torno CNC.

En la Figura 40 se visualiza el inserto y su posicionamiento correspondiente para el mecanizado de las probetas.

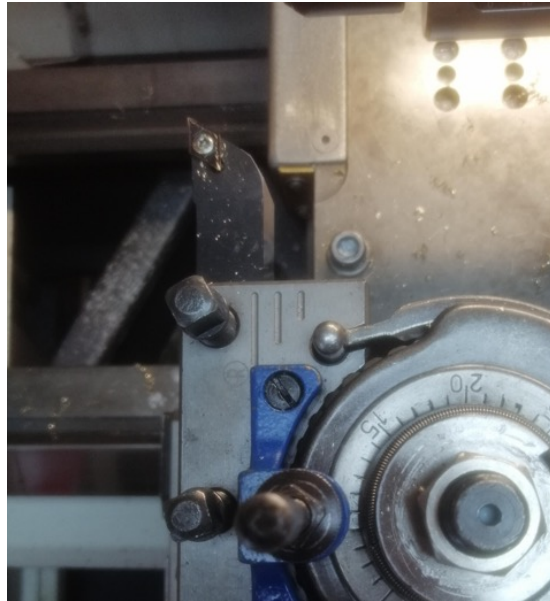


Figura 40. Inserto utilizado en el mecanizado CNC.

En la Figura 41 se observa el mecanizado en seco de las muestras en el bronce naval bajo los parámetros correspondientes de cada probeta.

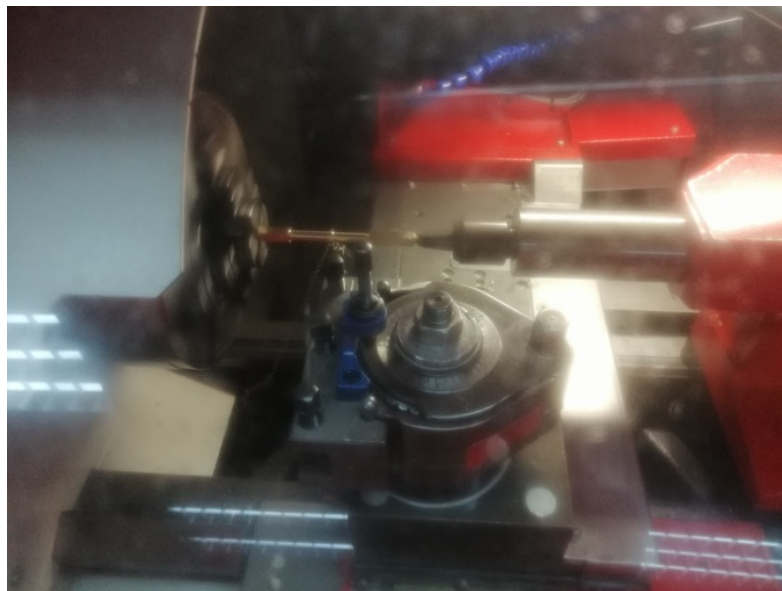


Figura 41. Mecanizado CNC de probetas de bronce naval.

En la Figura 42 se visualiza el mecanizado en seco de las muestras en el bronce fosfórico bajo los parámetros correspondientes de cada probeta.

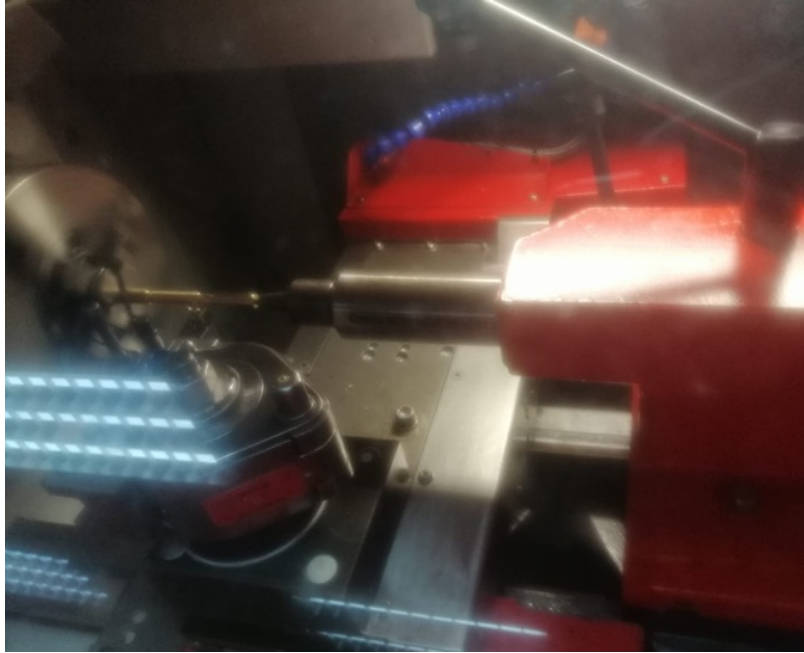


Figura 42. Mecanizado CNC de probetas de bronce fosfórico.

En la Figura 43 se muestra las 18 probetas, algunas ya en las que ya se realizó el mecanizado y otras que aún no se a realizado el torneado correspondiente.



Figura 43. Probetas mecanizadas y sin mecanizar.

En la Figura 44 se visualiza la medición de cada probeta luego del mecanizado final, en donde se corroboró los 8 mm de diámetro y los 125 mm de longitud.



Figura 44. Medición de las probetas para corroborar medidas.

2.7 Valores de rugosidad obtenidos con los diferentes avances

En la Figura 45 a la Figura 47 se muestran los valores que se obtuvo en el rugosímetro para cada avance seleccionado.



Figura 45. Rugosidad obtenida para N7.



Figura 46. Rugosidad obtenida para N9.



Figura 47. Rugosidad obtenida para N10.

En la Tabla 21 se registró los resultados obtenidos de cada medición realizada en las probetas de bronce naval para cada nivel de acabado superficial.

Tabla 21. Tabla de valores de rugosidad en bronce naval.

Ensayo	$fn \left[\frac{\text{mm}}{\text{rev}} \right]$	Calidad	Ra ₁ [μm]	Ra ₂ [μm]	Ra ₃ [μm]	Ra prom [μm]
1	0.08	N7	1.830	2.078	2.106	2.004
2	0.15	N9	6.487	6.292	6.545	6.441
3	0.23	N10	13.872	14.106	14.345	14.107

En la Tabla 22 se registró los resultados obtenidos de cada medición realizada en las probetas de bronce Fosfórico para cada nivel de acabado superficial.

Tabla 22. Tabla de valores de rugosidad en bronce fosfórico.

Ensayo	$fn \left[\frac{\text{mm}}{\text{rev}} \right]$	Calidad	Ra ₁ [μm]	Ra ₂ [μm]	Ra ₃ [μm]	Ra prom [μm]
1	0.08	N7	2.071	2.214	2.053	2.113
2	0.15	N9	6.257	6.689	6.365	6.437
3	0.23	N10	14.272	13.805	14.017	14.031

2.8 Resultados tabulados del ensayo

Los datos que la máquina de torsión pidió ingresar antes de realizar el ensayo fueron los del diámetro (d) que es igual a 8 [mm] y la longitud calibrada (Lo) que es 55 [mm].

En la Tabla 23 se tabuló los datos obtenidos del ensayo a torsión realizado en la Universidad Politécnica Salesiana de Quito - Sur para las probetas de bronce naval AB2 y en la Figura 48 se muestra la variación de los resultados de torque.

Tabla 23. Datos del ensayo del bronce naval en Quito.

Nº	D [mm]	Área [mm^2]	Ra [μm]	Max Torque [N·m]	Upper yield torque [N·m]	Upper yield stress [MPa]	Torsion angle (°)
1	8	50.27	N7	25.90	14.34	285	191.45
2	8	50.27	N7	61.41	46.58	927	190.50
3	8	50.27	N7	43.15	27.51	520	63.34
1	8	50.27	N10	42.29	27.93	556	163.32
2	8	50.27	N10	30.48	17.88	356	192.38
3	8	50.27	N10	27.82	17.03	339	165.41

En la Figura 48 se muestra cómo varía el torque máximo soportado por el bronce naval N10 y N7 en función del acabado superficial, por lo que, se observa una disminución significativa del torque máximo en las probetas con acabado N10 respecto a las del acabado N7.

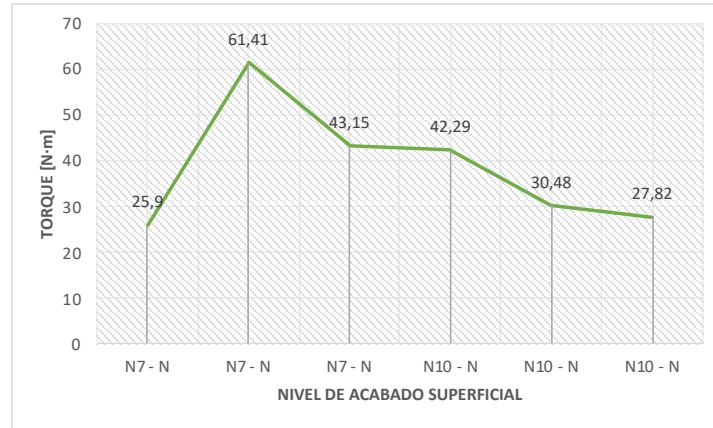


Figura 48. Torque - Acabado, resultados del N7 y N10 de bronce naval.

En la Tabla 24 se tabuló los datos obtenidos del ensayo a torsión realizado en la Universidad Politécnica Salesiana de Quito - Sur para las probetas de bronce fosfórico SAE40.

Tabla 24. Datos del ensayo del bronce fosfórico en Quito.

Nº	D [mm]	Área [mm ²]	Ra [μm]	Max Torque [N·m]	Upper yield torque [N·m]	Upper yield stress [MPa]	Torsion angle (°)
1	8	50.27	N10	35.12	25.50	507	591.31
2	8	50.27	N10	35.41	25.86	514	555.54
3	8	50.27	N10	35.30	25.72	510	554.30

El comportamiento del bronce fosfórico SAE 40 con acabado N10 se muestra en la Figura 49, a pesar de tener una rugosidad alta, la aleación logra mantener un nivel de torque relativamente elevado lo que indica que el material tiene una mejor tolerancia al deterioro superficial.

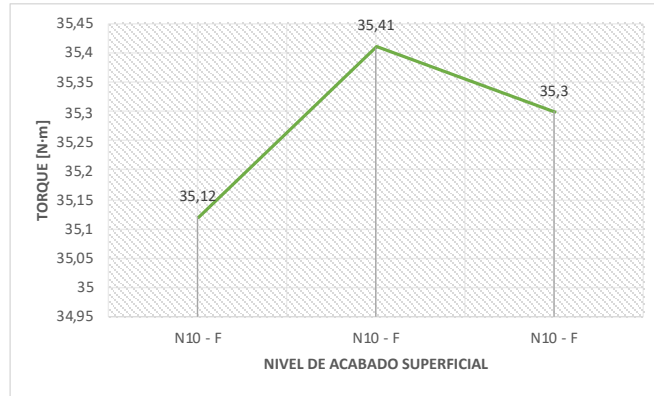


Figura 49. Torque - Acabado, resultados del N10 de bronce fosfórico.

Debido a una falla en un sensor de la máquina a torsión de la Universidad Politécnica Salesiana de Quito - Sur, los resultados de dos probetas no se mostraron en el programa del ordenador correspondiente, es decir, la máquina solo realizó la ruptura de las probetas.

Por lo que se decidió a utilizar una máquina de ensayos a torsión de la Universidad Politécnica Salesiana sede Cuenca mostrada en la Figura 52, en donde, se obtuvo los resultados detallados en la Tabla 25.

Tabla 25. Resultados de Cuenca de las dos aleaciones de bronce.

Bronce	Nº	Diámetro [mm]	Área [mm ²]	Ra [µm]	Max Torque [N·m]	Torsion angle [°]
Fosfórico	1	8	50.27	N7	4.99	370
	1	8	50.27	N9	4.60	265.2
	2	8	50.27	N9	4.80	288.2
	3	8	50.27	N9	4.67	275.2
Naval	1	8	50.27	N9	8.38	81
	2	8	50.27	N9	8.57	100
	3	8	50.27	N9	8.47	80.5

La Figura 50 compara el torque entre el bronce fosfórico y naval, ambos con el mismo acabado N9, mostrando un mayor torque las probetas de bronce naval.

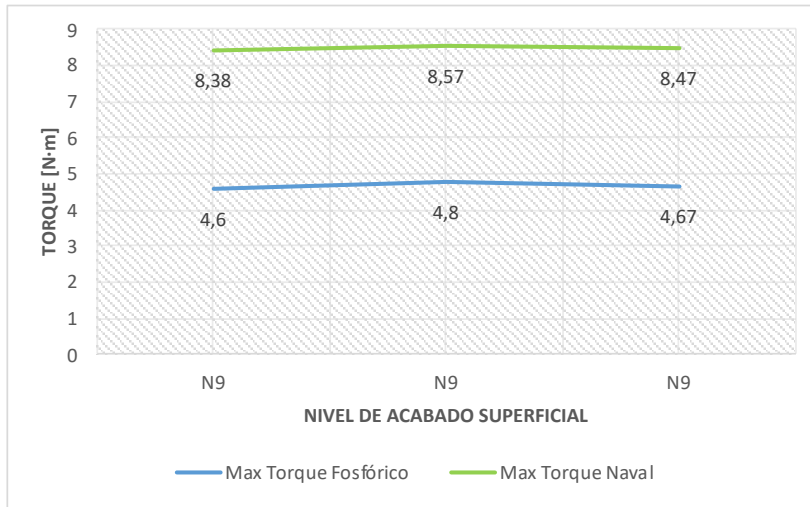


Figura 50. Torque en bronce fosfórico con acabados N7 y N9, y bronce naval N9.

Se ilustran los ángulos de giro alcanzados por las probetas en la Figura 51, las probetas de bronce fosfórico tanto en N7 como en N9 superan en deformación angular al bronce naval, lo que indica una mayor ductilidad y resistencia a la torsión acumulada en las aleaciones.

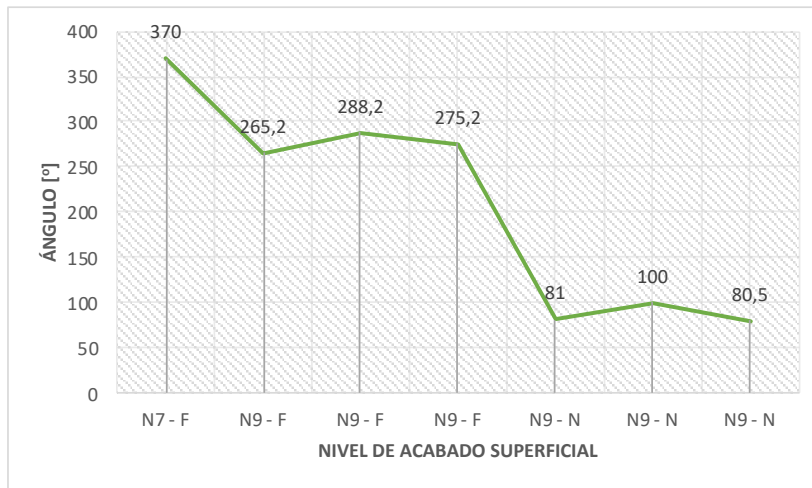


Figura 51. Ángulo – Acabado superficial en bronce fosfórico (N7 y N9) y en naval (N9).



Figura 52. Máquina a torsión de Cuenca

Una vez obtenidos los resultados de la UPS Quito - Sur y de la sede de Cuenca, se vio una variación significativa entre los datos tabulados, por lo que, se decidió simular en Solidworks a través de un análisis no lineal para apreciar el daño progresivo o la falla.

En la Figura 53 a la Figura 56 se muestra los resultados de la simulación en la probeta con un acabado superficial fino, lo que simula a las muestras realizadas en las aleaciones de bronce con el acabado de nivel N7 correspondiente a una rugosidad de $2.00\ \mu\text{m}$ y un avance de $0.08\ \text{mm/rev}$.

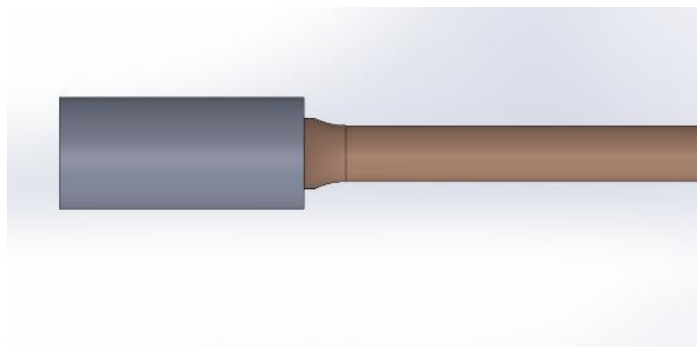


Figura 53. Acabado superficial N7 de la probeta de bronce.

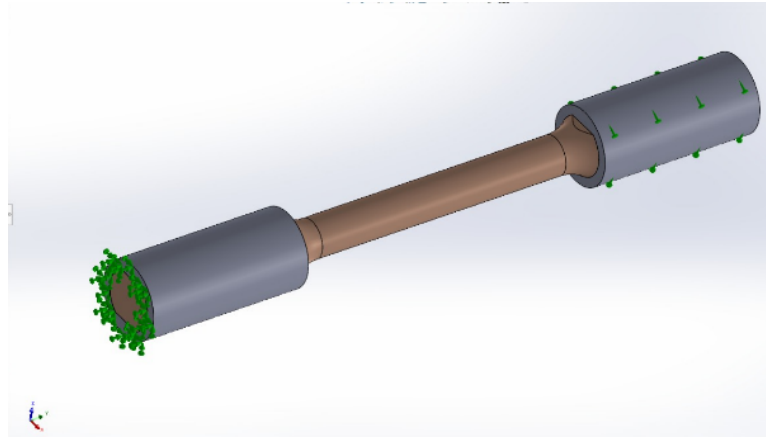


Figura 54. Lado fijo y lado rotacional de la probeta N7.

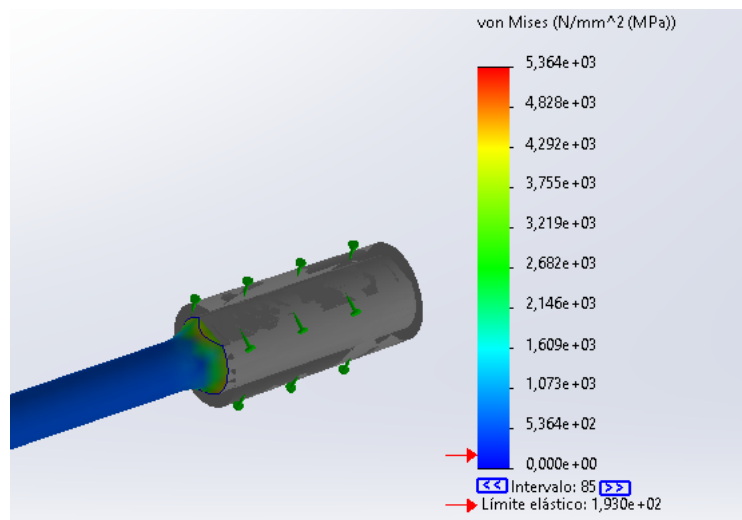


Figura 55. Límite elástico de la probeta de bronce N7.

Momento de reacción (N.m)

Componente	Selección	Todo el modelo
Sum X:	0,	2,0233
Sum Y:	0,	-14,418
Sum Z:	0,	-13,328
Resultante:	0,	19,739

Gráfica de respuesta:

Figura 56. Resultado en $[N \cdot m]$ del análisis no lineal para N7.

En la Figura 57, Figura 58, Figura 59 y Figura 60 se muestra los resultados de la simulación en la probeta con un acabado superficial áspero, lo que simula las muestras realizadas en las aleaciones de bronce con el acabado de nivel N9 correspondiente a una rugosidad de $7.03 \mu\text{m}$ y un avance de 0.15 mm/rev .

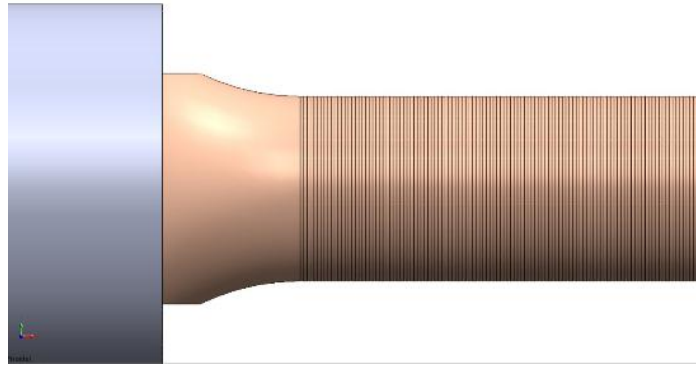


Figura 57. Acabado superficial N9 de la probeta de bronce.

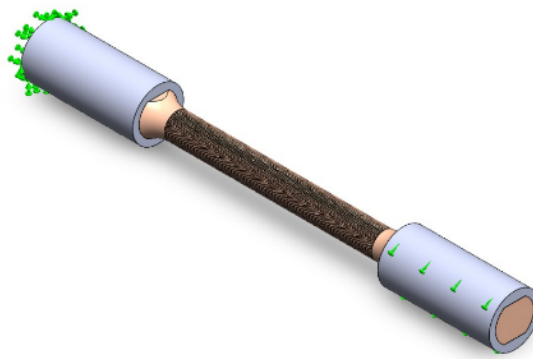


Figura 58. Lado fijo y lado rotacional de la probeta N9.

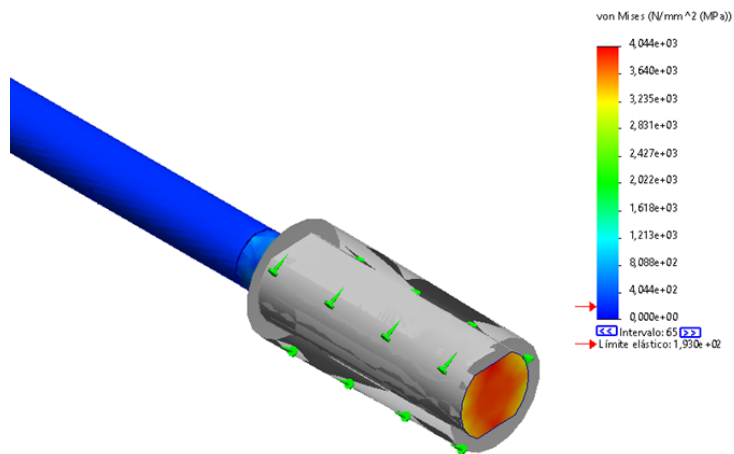


Figura 59. Límite elástico de la probeta de bronce N9.

Momento de reacción (N.m)		
Componente	Selección	Todo el modelo
Sum X:	0,	-1,6759
Sum Y:	0,	-14,495
Sum Z:	0,	-8,9886
Resultante:	0,	17,138


Gráfica de respuesta: 

Figura 60. Resultado en $[N \cdot m]$ del análisis no lineal para N9.

Finalmente, en la Figura 61 a la Figura 64 se muestra los resultados de la simulación en la probeta con un acabado superficial rugoso, lo que simula las muestras realizadas en las aleaciones de bronce con el acabado de nivel N10 correspondiente a una rugosidad de $12.5 \mu\text{m}$ y un avance de 0.23 mm/rev .

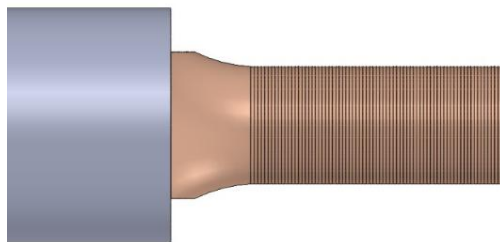


Figura 61. Acabado superficial N10 de la probeta de bronce.



Figura 62. Lado fijo y lado rotacional de la probeta N10.

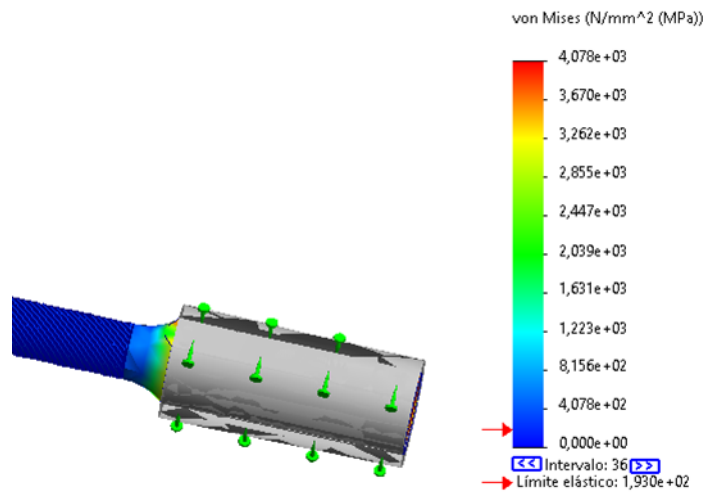


Figura 63. Límite elástico de la probeta de bronce N10.

Componente	Selección	Todo el modelo
Sum X:	0,	-10,003
Sum Y:	0,	-0,80188
Sum Z:	0,	-6,6714
Resultante:	0,	12,05

Gráfica de respuesta:

Figura 64. Resultado en $[N \cdot m]$ del análisis no lineal para N10.

En la Tabla 26 se tabularon los resultados obtenidos de la simulación de las probetas en SolidWorks.

Tabla 26. Resultados del torque de la simulación.

Nº	Avance	Diámetro [mm]	Área [mm ²]	Ra [µm]	Max Torque [N·m]
1	0.08	8	50.27	N7	19.74
1	0.15	8	50.27	N9	17.14
1	0.23	8	50.27	N10	12.05

La Figura 65 resume los resultados obtenidos mediante simulación, el análisis no lineal permitió identificar zonas críticas de concentración de esfuerzos en las probetas con las diferentes rugosidades, validando que acabados superficiales más finos reducen las tensiones localizadas, mejorando la resistencia a la torsión.

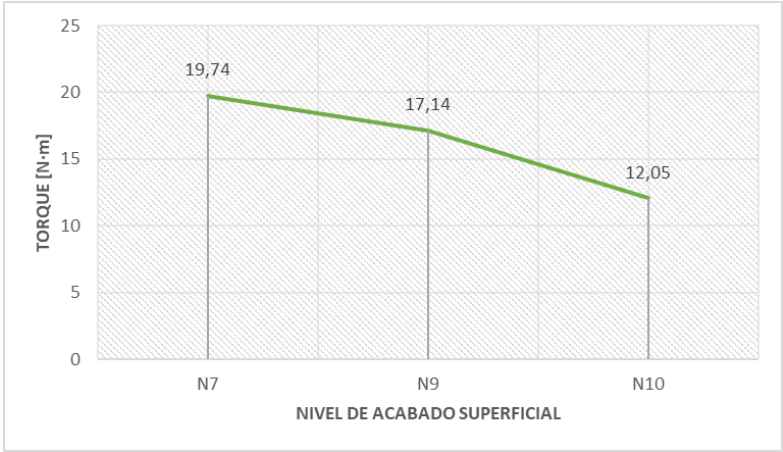


Figura 65. Torque – Acabado de la simulación en una probeta de bronce.

CAPÍTULO III

ANÁLISIS ESTADÍSTICO

3.1 Análisis observacional de Quito

Se realiza las primeras hipótesis del cambio de las probetas al ser sometidas a torsión en la máquina de Quito.

3.1.1. *Probetas N10 – bronce naval AB2*

En las probetas con el nivel de acabado superficial superior se observó que la falla frente a la torsión fue muy rápida. Además, las muestras presentaron la ruptura en la parte inicial de la longitud paralela según lo mostrado en la Figura 66, cerca del lado del plato móvil, por lo que, se consideró que se produce debido a que los primeros picos de la sección circular son los que reciben la fuerza de torsión de manera directa e inmediata, lo que provoca el fallo en las primeras irregularidades.



Figura 66. Ensayo de probetas de bronce naval N10.

3.1.2. *Probetas N7 – bronce naval AB2*

En las probetas con el nivel de acabado superficial más fino N7 se observó que la resistencia a la torsión es mejor que las del N10. Pero estas muestras, en cambio presentaron la ruptura en la parte final de la longitud paralela como se muestra en la Figura 67, cerca del lado del plato fijo,

aunque el tiempo en que se rompió fue un poco mayor al de las N10 y según la línea trazada también giró un poco más.



Figura 67. Ensayo de probetas de bronce naval N7.

3.1.3. Probetas N10 – bronce fosfórico SAE40

Las probetas en bronce fosfórico con el acabado superficial de N10 presentaron una menor resistencia a comparación del dato más alto obtenido en el bronce naval con el mismo acabado, pero también la ruptura de las muestras fue en la parte cercana a la del plato fijo como se muestra en la Figura 68, es decir, que el fallo por torsión se presentó en los últimos picos donde se aplica la fuerza de giro.



Figura 68. Ensayo de probetas de bronce fosfórico N10.

3.1.4. Probetas N7 – bronce fosfórico SAE40

Aunque no se obtuvieron resultados del servidor, se observó que las probetas de bronce fosfórico con el acabado más fino, es decir, N7 son las que más se deformaron, ya que resistió cerca de 2 giros completos y el acabado que se veía liso al final tomó un aspecto de envejecimiento, lo que se observa en la Figura 69.



Figura 69. Ensayo de probetas N7 en bronce fosfórico.

3.2 Análisis comparativo de resultados en Quito

Se utilizará el análisis a través del cambio porcentual para evaluar el cambio relativo de los resultados, se utiliza la ecuación 13 para calcular la variación:

$$\% = \frac{\text{Valor nuevo} - \text{Valor inicial}}{\text{Valor inicial}} \cdot 100 \quad (14)$$

3.2.1. Producción porcentual bronce naval

En la Tabla 27 se muestra el torque más alto según los datos de la Tabla 23, para poder realizar una comparación de resultados en base a los diferentes acabados superficiales.

Tabla 27. Comparación del torque promedio del bronce naval obtenido en Quito.

Acabado	T_{máx} [N·m]
N7	61.41
N10	42.29

Utilizando la ecuación (14) se calcula:

$$\% = \frac{61.41 - 42.29}{42.29} \cdot 100 = 45.21\%$$

Entonces se demostró que las probetas con el nivel de acabado superficial de N7 presentan un 45.21% más de resistencia a la torsión en comparación con las del acabado de N10 en el mismo material.

3.2.2. Comparación bronce fosfórico

Aunque el nivel porcentual no se puede comparar apropiadamente según la Tabla 24 se puede afirmar que las muestras de N7 soportaron la torsión mucho más que las muestras N10 antes de presentar la ruptura. Para entenderlo mejor las probetas N10 giraron tan solo $\frac{1}{4}$ de vuelta y se presentaron la falla, en cambio las probetas N7 giraron $\frac{6}{4}$ es decir más de $1 \frac{1}{2}$ vuelta y presentaron la ruptura, así como el deterioro de la superficie.

3.2.3. Producción porcentual bronce naval – bronce fosfórico

En la Tabla 28 se realiza la comparación para saber la variación entre el torque promedio del N10 de bronce fosfórico y el torque máximo del N10 de bronce naval con el mismo acabado superficial.

Tabla 28. Comparación de torque entre aleaciones de acabado N10 obtenidos en Quito.

Material	Acabado	T_{máx} [N·m]
B. Fosfórico	N10	35.28
B. Naval	N10	42.29

Utilizando la ecuación (14) se calcula:

$$\% = \frac{42.29 - 35.28}{35.28} \cdot 100 = 19.87\%$$

Se puede evidenciar que el bronce naval presenta un 19.87% más de torque máximo en comparación con el torque del bronce fosfórico, eso quiere decir que es más resistente frente a esfuerzos torsionales.

3.3 Análisis observacional de Cuenca

Se realiza las primeras hipótesis del cambio de las probetas al ser sometidas a torsión en la máquina de Cuenca.

3.3.1. Probetas N7 – bronce fosfórico

Al igual que en los ensayos de Quito, las probetas N7 presentaron deterioro en el acabado debido a los giros que realizó y su ruptura se presentó en un lugar un poco más centrado de la longitud calibrada y se visualiza en la Figura 70.



Figura 70. Probeta N7 en bronce fosfórico luego del ensayo.

3.3.2. *Probetas N9 – bronce fosfórico*

En las probetas N9 el giro fue mayor a las del acabado fino, dando un promedio de giro promedio de una vuelta completa, además la ruptura se presentó cerca de la parte central y cerca del plato fijo.

En las Figura 71, 72 y 73 se observan el resultado de las probetas luego del ensayo a torsión.



Figura 71. Primera probeta N9 en bronce fosfórico luego del ensayo.



Figura 72. Segunda probeta N9 en bronce fosfórico luego del ensayo.



Figura 73. Tercera probeta N9 en bronce fosfórico luego del ensayo.

3.3.3. *Probetas N9 – bronce naval*

En las probetas N9 del bronce naval el giro no fue tan notorio como en las del bronce fosfórico, es decir no llegó a girar una vuelta, y su ruptura fue parecida a las del acabado N10 realizado en Quito, es decir, cerca del plato móvil.

El estado de las probetas sometidas al ensayo a torsión se muestra en la Figura 74, Figura 75 y Figura 76.



Figura 74. Primera probeta N9 en bronce naval luego del ensayo.



Figura 75. Segunda probeta N9 en bronce naval luego del ensayo.



Figura 76. Tercera probeta N9 en bronce naval luego del ensayo.

3.4 Análisis comparativo de resultados en Cuenca

Se utilizará el análisis a través del cambio porcentual para evaluar el cambio relativo de los resultados, se utiliza la ecuación 13 para calcular la variación:

3.4.1. Producción porcentual bronce fosfórico

Con los resultados obtenidos en la Tabla 25, se puede encontrar el torque y ángulo promedio mostrado en la Tabla 29.

Tabla 29. Comparación del torque y ángulo promedio de Cuenca, del acabado N7 y N9.

Acabado	T_{máx} [N·m]	Ángulo[°]
N7	4.99	370
N9	4.70	276.7

Utilizando la ecuación (14) se calcula:

$$\% = \frac{4.99 - 4.70}{4.70} \cdot 100 = 6.17\%$$

Según los resultados tabulados, se conoce que las probetas con el acabado N7 presentan una resistencia de un 6.17% más de torque antes de la ruptura en comparación con las del N9, evidenciando una mejor resistencia mecánica asociada a una menor rugosidad.

Utilizando la ecuación (14) se calcula:

$$\% = \frac{370 - 276.7}{276.7} \cdot 100 = 33.7\%$$

Y en cuanto al ángulo, las probetas N7 muestran una mayor deformación de 33.7% antes de la fractura en comparación con las probetas N9, lo que evidencia una mejor capacidad de deformación antes de la fractura con rugosidades más bajas.

3.4.2. Producción porcentual entre bronce fosfórico y naval

Según los resultados de la Tabla 25 obtenidos en Cuenca se puede comparar el bronce naval y fosfórico con el mismo acabado superficial luego de los ensayos a torsión. Por lo que, en la Tabla 30 se obtiene el torque máximo y el ángulo.

Tabla 30. Comparación del torque y ángulo de Cuenca, en bronce fosfórico (N7 y N9) y naval (N9).

Material	Acabado	T_{máx} [N·m]	Ángulo [°]
B. Fosfórico	N9	4.70	276.7
B. Naval	N9	8.47	260.5
B. Fosfórico	N7	4.99	370

Los resultados de torque obtenidos para los mismos niveles de acabado fueron comparados de manera porcentual:

- N9 – N vs N9 – F

Utilizando la ecuación (14) se calcula:

$$\% = \frac{8.47 - 4.70}{4.70} \cdot 100 = 80.47\%$$

Sobre el torque que soporta cada material antes de la fractura, se puede analizar que el bronce naval con un acabado de N9 presenta mayor resistencia a la torsión en comparación al bronce fosfórico con el mismo acabado, con un 80.47% más de torque.

Luego se compara los ángulos obtenidos para tener una referencia de los giros que realizó cada probeta en el ensayo.

- N9 – N vs N9 – F

Utilizando la ecuación (14) se calcula:

$$\% = \frac{276.7 - 260.5}{260.5} \cdot 100 = 6.21\%$$

- N7 – N vs N9 – F

Utilizando la ecuación (14) se calcula:

$$\% = \frac{370 - 260.5}{260.5} \cdot 100 = 29.59\%$$

En cuanto a la deformación del material o al giro que aguanta antes de la falla, el bronce fosfórico tiene un mayor ángulo con un 6.21% superior al del bronce naval en los mismos acabados N9, en cambio, entre un acabado de N7 del bronce fosfórico hay un 29.59% más de resistencia a la deformación en comparación con el acabado N9 en bronce naval.

3.5 Análisis comparativo de resultados SolidWorks

SolidWorks es la herramienta práctica para simulaciones, así como, entender mejor materiales y piezas diseñadas.

3.5.1. Producción porcentual del bronce con diferentes acabados

En la Tabla 26 se tabuló el torque máximo alcanzado por probetas con tres niveles de acabado superficial en SolidWorks: N7, N9 y N10, entonces según estos datos se realiza la comparación, tomando como referencia el acabado N7, ya que presenta la mayor resistencia simulada, partiendo de aquí se calculan los descensos porcentuales para N9 y N10.

- N9 vs N7

Utilizando la ecuación (14) se calcula:

$$\% = \frac{19.74 - 17.14}{19.74} \cdot 100 = 13.17\%$$

- N10 vs N7

Utilizando la ecuación (14) se calcula:

$$\% = \frac{19.74 - 12.05}{12.05} \cdot 100 = 63.81\%$$

Las probetas con un nivel de calidad N7 simulado ofrecen la mayor resistencia a la torsión, alcanzado un torque máximo de 19.74 [Nm], por lo que, a medida que la rugosidad aumenta la capacidad de la probeta para resistir la torsión disminuye, entonces se obtiene que el acabado N7 presentó un mayor torque del 13.17% respecto al nivel de acabado N9 y del 63.81% respecto al N10.

Los resultados del análisis también validan que un acabado superficial más rugoso actúa como concentrador de esfuerzos iniciando la falla con mayor facilidad bajo cargas torsionales.

3.6 Comparación de todos los resultados

Se compara los resultados de la manera en la que se comprenda mejor para obtener ideas sólidas sobre el comportamiento de cada aleación con los diferentes acabados superficiales.

3.6.1. Resultados del ensayo comparados con la simulación

Una vez procesados los datos experimentales obtenidos en el ensayo de Quito y Cuenca, así como los resultados simulados mediante análisis no lineal en SolidWorks, se procedió a establecer una comparación directa para validar la correlación entre el torque máximo y el tipo de acabado superficial. Las Figuras 77 y 78 muestran las gráficas finales de esta comparación para las aleaciones de bronce, respectivamente.

Primero, de acuerdo con la simulación, se evidenció que un aumento en la rugosidad del acabado superficial disminuye el torque máximo que una probeta puede soportar. Es decir, un acabado más fino (N7) con un torque de 19.74 [$N \cdot m$] permite que el material resista mayor torsión antes de fallar, un acabado más áspero (N9) con un torque de 17.14 [$N \cdot m$] soporta menos, mientras que un acabado más rugoso (N10) con torque de 12.05 [$N \cdot m$] reduce aún más esta capacidad.

- Comparación de Torque entre los ensayos

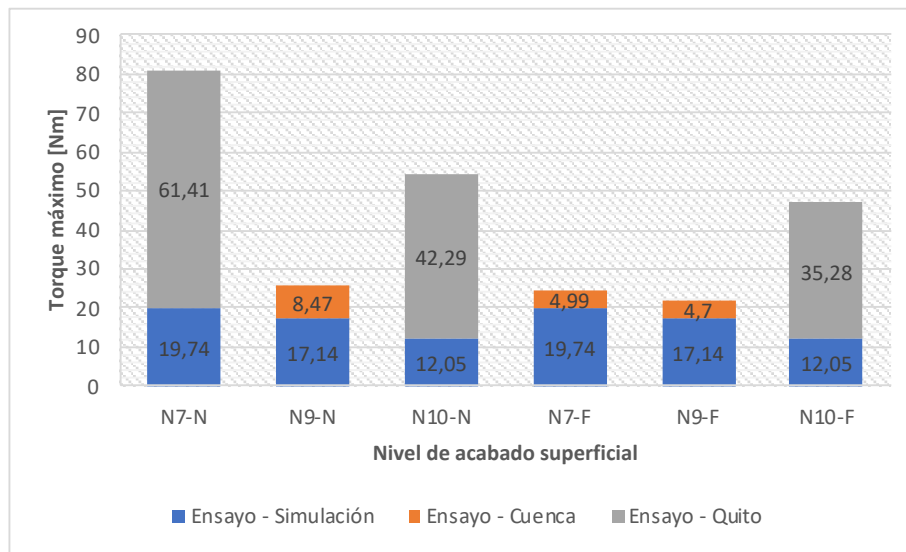


Figura 77. Torque máximo – Acabado superficial, de los ensayos.

El uso de los datos del ensayo realizado en Cuenca entrega un torque no tan alto, pero los valores obtenidos presentan una relación adecuada en los valores de torque y de ángulo, es decir, en los 3 ensayos de cada probeta con diferente nivel de acabado superficial la variación en los resultados se encontró dentro del mismo rango. Con los resultados de Cuenca se puede afirmar que el bronce naval presenta una mayor resistencia de torque hasta la falla a comparación del bronce naval, lo que se justifica por su mayor valor en propiedades mecánicas como: límite elástico, módulo de elasticidad en cortante y resistencia a la tracción.

Para afirmar que a mayor rugosidad menor torque, se detalla que en el bronce fosfórico la probeta N7 presentó un torque máximo de 4.99 [$N \cdot m$] y la N9 fue de 4.7 [$N \cdot m$].

Pero ahora en el bronce naval N9 el torque máximo fue de 8.47 [$N \cdot m$] y en el caso del bronce fosfórico con el mismo acabado fue de 4.7 [$N \cdot m$], verificando la mayor resistencia en el torque del primer material.

En el caso de los resultados que se obtuvo en la máquina de Quito sucede lo mismo, el torque máximo del bronce naval N7 (61.41 [$N \cdot m$]) es superior al del N10 (42.29 [$N \cdot m$]) y de igual manera este resultó ser superior al N10 (35.48 [$N \cdot m$]) del bronce fosfórico.

- Comparación de ángulo entre ensayos de Quito y Cuenca.

En la Tabla 31 se tabularon los ángulos de torsión de Cuenca y Quito respectivamente:

Tabla 31. Ángulo de torsión con acabados iguales en Cuenca.

Material	Acabado	Cuenca - Ángulo de Torsión (°)
Bronce naval	N9	81
	N9	100
	N9	80.5
	N10	192.38
	N10	165.41
	N10	163.32

Tabla 32. Ángulo de torsión con acabados iguales en Quito.

Material	Acabado	Quito - Ángulo de Torsión (°)
Bronce fosfórico	N9	265.2
	N9	275.2
	N9	288.2
	N10	591.31
	N10	555.54
	N10	558.3

En la Figura 78 se puede analizar apropiadamente como es el comportamiento de la deformación de las dos aleaciones frente a las mismas condiciones de rugosidad, los ensayos 1, 2 y 3 son con bronce naval y los ensayos 7, 8 y 9 son con el bronce fosfórico respectivamente, entonces la curva de la línea naranja permitió determinar que el bronce naval N10 presenta ángulos de torsión menores al del bronce fosfórico N10, y lo mismo pasa con los datos de Cuenca correspondientes a la línea azul pero con un acabado N9.

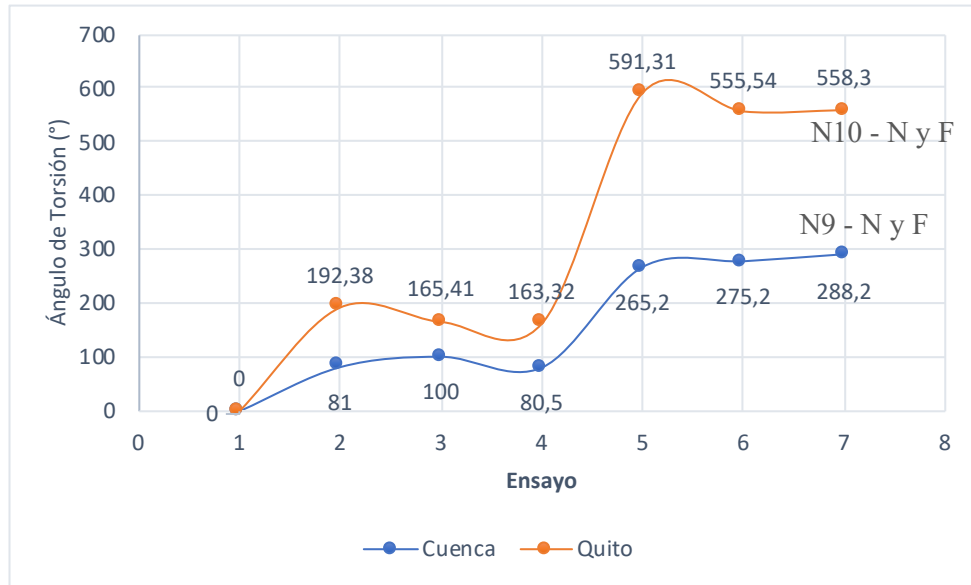


Figura 78. Ángulo de torsión – Ensayos de acabados iguales en las dos aleaciones.

CONCLUSIONES

Se evidencia que el bronce naval AB2 posee una resistencia a la tracción superior de 340 MPa frente al bronce fosfórico SAE40 ideal para soportar mayores cargas axiales antes de fracturarse, según fichas técnicas del proveedor, además de proporcionar una mejor resistencia frente a la corrosión por su composición química. Sin embargo, también se identificó la ausencia de datos sobre la resistencia a la torsión en ambas aleaciones, tanto en las fichas técnicas como en bases de datos especializados.

La obtención de rugosidades específicas en las probetas se logró mediante la aplicación de parámetros de corte controlados, utilizando insertos con radio de 0.4 mm y los avances de 0.08 mm/rev para N7, 0.15 mm/rev para N9 y 0.23 mm/rev para N10, alcanzando rugosidades de 2.11 μm , 6.44 μm y 14.07 μm en el bronce fosfórico, y 2.00 μm , 6.43 μm y 14.03 μm en el bronce naval confirmando una adecuada correspondencia con las calidades superficiales previstas, además, la estandarización en el mecanizado y ensayo bajo la Norma permitió trabajar con los lineamientos pertinentes para generar datos útiles usados en la etapa posterior.

Los resultados en ambos laboratorios permitieron establecer de manera clara la influencia de la rugosidad, en el caso de las probetas de bronce naval AB2 las muestras con acabado N10 debido al aumento de la rugosidad presentaron una reducción del 31.13% en comparación a las del acabado N7. Además, en el bronce SAE40 sucedió lo mismo con un 6.17% más de resistencia del acabado N7 frente al N9.

Considerando la influencia de la rugosidad en los ensayos a torsión, para la máquina de torsión de la Universidad Politécnica Salesiana de Quito – Sur se recomienda un mantenimiento correctivo para calibrar los sensores o comunicarse con los proveedores debido a fallas en dos probetas que no registraron datos. También se sugiere revisar la precisión del sistema en la máquina de Cuenca dando garantía de los datos obtenidos en el ensayo.

RECOMENDACIONES

Es recomendable definir un procedimiento metodológico antes de realizar todo el proceso del ensayo, para así, contar con una guía estructurada que servirá de apoyo constante a lo largo de la investigación, el proceso de mecanizado y el análisis correspondiente.

Es importante tener en cuenta los parámetros de corte que se utilizará para cada grupo experimental, así como las herramientas adecuadas para el mecanizado en seco, ya que se necesita de alta estabilidad térmica y resistencia al desgaste para garantizar acabados superficiales definidos, que además son determinantes en el ensayo a torsión de las aleaciones de bronce.

Verificar valores de rugosidad, dimensiones, y factores de las probetas que puedan afectar la recolección de datos del ensayo, para aplicar un tratamiento sistemático al análisis de datos diferenciando el efecto de las rugosidades en cada tipo de bronce, lo que refuerza la validez de las conclusiones del estudio.

Debe considerarse el ajuste adecuado de las probetas y los platos de la máquina de torsión de la Universidad Politécnica Salesiana Quito – Sur para evitar deslizamientos a la hora del ensayo en probetas con superficies lisas para obtener mejores resultados.

REFERENCIAS

- [1] S. Poveda, “ACABADOS SUPERFICIALES Group Group Graphics Graphics Visual Visual,” 2001.
- [2] Z. Song and O. Tegus, “The Corrosion Properties of Bronze Alloys in NaCl Solutions,” *Materials*, vol. 16, no. 14, Jul. 2023, doi: 10.3390/ma16145144.
- [3] D. Y. Pimenov *et al.*, “Review of improvement of machinability and surface integrity in machining on aluminum alloys,” Dec. 01, 2023, *Springer Science and Business Media Deutschland GmbH*. doi: 10.1007/s00170-023-12630-4.
- [4] C. DE Ingeniería Mecánica, I. E. La Pérdida De Volumen, J. Diego Pérez Quiroga TUTOR, and I. Mg Juan Gilberto Paredes Salinas, “UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA "ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE DESGASTE ABRASIVO DEL BRONCE SAE 40 Y SAE 64 BAJO LA NORMA ASTM G-65 Y SU,” 2014.
- [5] “Introduction to Composite Materials.”
- [6] “BRONCE FOSFÓRICO - PROVEIN WEB.” Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: <https://provein.com.ec/bronce-fosforico/>
- [7] “BRONCE FOSFÓRICO - PROVEIN WEB.” Accessed: Jun. 08, 2025. [Online]. Available: <https://provein.com.ec/bronce-fosforico/>
- [8] C. DE Ingeniería Mecánica, I. E. La Pérdida De Volumen, J. Diego Pérez Quiroga TUTOR, and I. Mg Juan Gilberto Paredes Salinas, “UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA "ESTUDIO DE LOS PARÁMETROS DE DESGASTE ABRASIVO DEL BRONCE SAE 40 Y SAE 64 BAJO LA NORMA ASTM G-65 Y SU,” 2014.
- [9] “El Bronce Fosfórico: Un Material Clave en la Industria Metalmeccánica.” Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: <https://www.indumet.cl/post/el-bronce-fosf%C3%B3rico-un-material-clave-en-la-industria-metalmec%C3%A1nica>

- [10] “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO CARRERA: INGENIERÍA MECÁNICA Trabajo de titulación previo a la obtención del título de: INGENIERA MECÁNICA TEMA: CARACTERIZACIÓN DE LAS PROBETAS SOLDADAS POR FRICCIÓN MEDIANTE PRUEBAS DE TRACCIÓN Y TORSIÓN PARA.”
- [11] “Aufhauser - C470 Naval Bronze Alloy.” Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: https://www.brazing.com/products/Brazing_alloys/C470.1.aspx
- [12] “C464-Insert”.
- [13] “Descubra las propiedades integrales de la aleación de bronce y aluminio - Goldsupplier.” Accessed: Jun. 08, 2025. [Online]. Available: <https://blog.goldsupplier.com/es/aluminum-bronze-properties/>
- [14] “¿Qué es el bronce naval? - Coppermetal.” Accessed: Apr. 26, 2025. [Online]. Available: <https://coppermetal.com.br/es/blog/es-blog-es-4/>
- [15] “pub206-18”.
- [16] “Página 1 de 5 Bronze, CuAl10Ni5Fe4Mn1, C95800, cast (aluminum bronze) General information Mechanical properties.”
- [17] “catalogo-bronce-es (1)”.
- [18] “Copper-lead alloy, CuPb5Sn5Zn5 (85-5-5-5), C83600, cast (leaded gunmetal) General information.”
- [19] “Metallic materials-Wire-Simple torsion test Matériaux métalliques-Fils-Essai de torsion simple iTeh STANDARD PREVIEW,” 2003.
- [20] B. Caballero Agüero, L. Alberto, B. Castillo Arizola, and C. Enrique, “UNIVERSIDAD NACIONAL DE TRUJILLO FACULTAD DE INGENIERÍA ESCUELA ACADÉMICO PROFESIONAL DE INGENIERÍA MECÁNICA TESIS PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO MECÁNICO DISEÑO,

CONSTRUCCIÓN Y CALIBRACIÓN DE UNA MÁQUINA PARA ENSAYOS DE TORSIÓN DE ALAMBRES SEGÚN LA NORMA ISO 7800.”

- [21] “Modo de funcionamiento4 Mantenimiento 6.”
- [22] “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA DE MADRID ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA AERONÁUTICA Y DEL ESPACIO,” 2013.
- [23] S. Poveda, “ACABADOS SUPERFICIALES Group Group Graphics Graphics Visual Visual,” 2001.
- [24] V. Pérez *et al.*, “Propuesta metodológica para el estudio de las rugosidades superficiales y su representación en los planos (Original).,” *Periodicidad: Frecuencia continua*, vol. 18, no. 4, 2022.
- [25] J. Javier Escobar Altamirano Tutor and I. Francisco Agustín Peña Jordán, “UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA CARRERA DE MECÁNICA TRABAJO EXPERIMENTAL PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO TEMA: "DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA DE LA JUNTA TRASLAPADA SIMPLE, ENTRE EL ACERO ESTRUCTURAL, RESINA EPÓXICA Y FIBRA DE CARBONO UNIDIRECCIONAL, UTILIZANDO MÉTODOS DE LIMPIEZA SUPERFICIAL,” 2023.
- [26] Carrera, “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO.”
- [27] “CD 13203”.
- [28] B. H. Cortez Pazmiño and A. Coque, “Análisis de desgaste para el fresado de muestras de aluminio AA 7075-T6,” *Congreso de Ciencia y Tecnología ESPE*, vol. 13, no. 1, Jun. 2018, doi: 10.24133/cctespe.v13i1.793.
- [29] Carrera, “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO.”
- [30] P. De, P. Mecánica, C. Aníbal, and E. Yépez, “ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL ESCUELA DE FORMACIÓN DE TECNÓLOGOS DIMENSIONAMIENTO Y

CONSTRUCCIÓN DE UNA MÁQUINA AFILADORA DE HERRAMIENTAS PARA TORNO PROYECTO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE TECNÓLOGO EN”.

- [31] “175cac_7c9b5c34990740389771d4f04ba00eb1”.
- [32] R. Rz and R. Rz, “2 平均線 評価長さ 確率密度 The Surfrest SJ-210 is a user-friendly surface roughness measurement instrument designed as a handheld tool that can be carried with you and used on-site. 2.4-inch color graphic LCD with backlight Displays assessed profiles and graphical data Multilingual support Stylus alarm (patent pending in Japan)”.
- [33] Carrera, “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO.”
- [34] “Tecnología de los oficios metalúrgicos - A. Leyensetter, G. Würtemberger - Google Libros.” Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: https://books.google.com.ec/books?id=YeLfJ0K-4bAC&printsec=frontcover&hl=es&source=gbs_ge_summary_r&cad=0#v=onepage&q&f=false
- [35] “ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA.”
- [36] “Manufactura, ingeniería y tecnología - Serope Kalpakjian, Steven R. Schmid - Google Libros.” Accessed: Apr. 27, 2025. [Online]. Available: https://books.google.com.co/books?id=gilYI9_KKAoC&printsec=frontcover#v=onepage&q&f=false
- [37] L. Arnaldo, S. González, F. Del, and R. Medina Aguirre, “ESCUELA SUPERIOR POLITÉCNICA DEL LITORAL Previo a la Obtención del Título de: INGENIEROS MECÁNICOS.”
- [38] H. Appold, K. Fei, F. Reinhard, and P. Schmidt, “Tecnología de los metales para profesiones técnicas EDITORIAL REVERTÉ.”

- [39] C. De and I. Mecánica, “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO Tesis previa a la obtención del título de: INGENIEROS MECÁNICOS.”
- [40] “EMCO EMCOMAT E-200 Tornos CNC - MachineTools.com.” Accessed: Jun. 15, 2025. [Online]. Available: <https://www.machinetools.com/es/models/emco-emcomat-e-200>
- [41] “Turning EMCOMAT E-200 MC.”
- [42] E. De, L. S. Basado, and E. N. La, “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA FRESADO DEL AISI 4340 CON ENTORNO DE MÍNIMA CANTIDAD DE LUBRICACIÓN PARA UNA RUGOSIDAD SUPERFICIAL DE $0.3 \mu\text{m} \pm 0.1 \mu\text{m}$.”
- [43] “Rugosidad Superficial.”
- [44] “CNC Machining Cycle Time Calculation | All You Need to Know.” Accessed: Jun. 08, 2025. [Online]. Available: <https://www.americanmicroinc.com/resources/cnc-machining-cycle-time-calculation/#:~:text=The%20formula%20for%20calculating%20turning,Travels%20x%20Number%20of%20Passes>
- [45] “ENSAYO DE TORSIÓN.”
- [46] M. Ortiz-Domínguez, A. Cruz-Avilés, A. Marcelo-Sandra, and A. M. Uribe-Miguel, “Torsión,” *Ingenio y Conciencia Boletín Científico de la Escuela Superior Ciudad Sahagún*, vol. 10, no. 19, pp. 81–90, Jan. 2023, doi: 10.29057/escs.v10i19.9885.
- [47] “torsion”.
- [48] U. N. Enfoque, A. L. Uso, D. E. Herramientas, T. Para, and V. De Resultados, *MECÁNICA DE MATERIALES*. [Online]. Available: www.uteq.edu.ec.
- [49] “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO CARRERA: INGENIERÍA MECÁNICA Trabajo de titulación previo a la obtención del título de: INGENIEROS MECÁNICOS TEMA: VALIDACIÓN DE LA VARIACIÓN DE LAS

PROPIEDADES MECÁNICAS A LA TORSIÓN DEL ACERO AISI/SAE 4140 TRATADO TERMICAMENTE POR TEMPLE A 830oC-860oC Y REVENIDO A 500oC. AUTORES: JORGE WILLY NUÑEZ SARAVIA ALEX DARIO YANGUISELA LOACHAMIN TUTORA: NANCY VERÓNICA MORENO DIAGO Quito, septiembre del 2020.”

- [50] “torsionfinal”.
- [51] I. J. Carlos and C. Valdivieso, “ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL FACULTAD DE INGENIERÍA MECÁNICA.”
- [52] J. M. Gere and B. J. Goodno, “MECÁNICA DE MATERIALES.”
- [53] “disec3b1o-en-ingenierc3ada-mecc3a1nica-de-shigley-8-edicic3b3n-budynas”.
- [54] Carrera, “UNIVERSIDAD POLITÉCNICA SALESIANA SEDE QUITO.”
- [55] “ESCUELA TÉCNICA SUPERIOR DE INGENIERÍA.”
- [56] P. Tecnológica, P. Israel Ganán Paca Alex Darío Mullo Aimacaña, and I. Segundo Ángel Cevallos Betún MsC Ing Byron Paúl Corrales Bastidas MsC Latacunga -Ecuador Julio, “UNIVERSIDAD TÉCNICA DE COTOPAXI FACULTAD DE CIENCIAS DE LA INGENIERÍA Y APLICADAS CARRERA DE INGENIERÍA ELECTROMECAÁNICA DETERMINAR EL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LOS MATERIALES”.
- [57] “HST-N1000W MANUAL”.
- [58] “Sussex Tool and Supply. SANDVIK DCMT 3(2.5)1-Powder Metal 4335 Turning Insert 55.0°.” Accessed: May 19, 2025. [Online]. Available: <https://products.sussextool.com/sandvik-dcmt-3251-powder-metal-4335-turning-insert-550>
- [59] “Sandvik-Coromant - 7080701 - Rhombic inserts - ToolsUnited.” Accessed: May 19, 2025. [Online]. Available: <https://toolsunited.com/EN/Article/Details/97248493081210981>

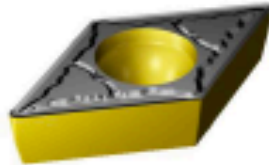
- [60] “DCMT 11 T3 04-PM 4335.” Accessed: May 19, 2025. [Online]. Available: <https://www.sandvik.coromant.com/de-de/product-details?c=7080701>
- [61] “DCMT11T304-PM 4335 PDF”.
- [62] S. Saha and P. P. Bandyopadhyay, “Non-destructive measurement of MUCT in micro-milling using surface topography generated by bi-planer size effects,” *Int J Mech Sci*, vol. 275, Aug. 2024, doi: 10.1016/J.IJMECSCI.2024.109332.

ANEXOS

Anexo 1. Parámetros del inserto DCMT 11T304 PM 4335.

DCMT 11 T3 04-PM 4335

CoroTurn® 107, [placa para torneado](#) >



Cantidad de paquetes: 10
 ISO: DCMT 11 T3 04-PM 4335
 D. de material: 7060701
 EAN: 7323221185183
 ANST: DCMT 3(2.5)14PM 4335

Representación genérica

[Mostrar modelo 3D](#)

P a_p 1,5 mm (0,3 = 3,2) f_z 0,15 mm/r (0,08 = 0,23) f_{max} 0,15 mm/r (0,08 = 0,23) v_c 275 m/min (330 = 235)	M a_p 1,5 mm (0,3 = 3,2) f_z 0,15 mm/r (0,08 = 0,23) f_{max} 0,15 mm/r (0,08 = 0,23) v_c 295 m/min (195 = 180)
---	---

Clasificación de material nivel 1 (TMC100)

P M

Descomposición de componentes (CBND)

PM

Tipo de operación (CTPF)

premachining with demand on surface

Código de modelo de montaje de placa (FIS)

Partly cylindrical, 40°/60 deg countersink on one or two sides

Fijación del diámetro del agujero (D1)

4,4 mm

Tamaño y forma de placa (GUTHT/SHAPE)

DC11T3

Número de filos (CLDC)

2

Diámetro de alfiler inserto (D)

9,225 mm

Código de forma de placa (SC)

Rhombic 95

Longitud efectiva del filo (LE)

11,2279 mm

Radio de punta (PR)

0,3959 mm

Marca (IAND)

Neutral

Calidad (GRAD)

4335

Sustrato (SUBSTRATE)

HC

Recubrimiento (COATING)

OVD TiCN+Al2O3+TiN

Grosor de placa (S)

3,9688 mm

Ángulo de incidencia principal (AN)

7°

Peso del elemento (WT)

0,0637 kg

Alojamiento de placa (SEC_M)

11

Vista en rot. Imperial de código de tamaño del alojamiento de la placa (SEC_M)

3/8

Release date (RELEASED)

18/01/17

Peso de paquete de emisión (RELEASEPRICE)

17,1

Anexo 2. Certificado de calidad del Bronce Fosfórico SAE 40.



Material Test Certificate



Certificate No. : TC 36389	Date : 7 November 2023
Customer : IMPORT COM / Leon Rea Victor Humberto	Customer O/N : 7/9/2023
AV. DE LA PRENSA N42-50	Internal Ref O/N : 239124
Y MARIANO ECHEVERRIA	Invoice No. : 327232
QUITO	Heat No. : See Attached List
RUC: 1703737351001	Packing Slip No. : See Attached List
	Page No. : 1 of 4

Material Description

Material Form Bronze Bar
Alloy LG2



Typical Chemical Composition: (All values in %)

Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Al	Mn	Ni	Sb	Si	P	As	S
Bal	4.55	5.7	5.85	0.2	0.01	0.035	0.5	0.1	0.005	0.01	0.025	0.05

Method Of Analysis: O. E. Spectrometer

Mechanical Results (Typical)

Tensile Strength	Elongation	Hardness BHN	Proof Strength
MPa	%		0.2%
300 MPa	20	75	120 MPa

Made In NEW ZEALAND



Sam Plummer
Metallurgical Engineer

AW Fraser Ltd www.awfraser.co.nz info@awfraser.co.nz Telephone 64 3 341 0027 Fax 64 3 348 0457
39 Lunns Road Middleton Christchurch 8024 PO Box 6055 Christchurch 8442 New Zealand

Anexo 2. Certificado de calidad del Bronce Naval AB2.



Material Test Certificate



Certificate No. : TC 31565

Date : 24 November 2020

Customer : iMPORT COM / Leon Rea Victor Humberto
AV. DE LA PRENSA N42-50
Y MARIANO ECHEVERRIA
QUITO
RUC: 1703737351001

Customer O/N : F2478D

Internal Ref O/N : 216454

Invoice No. : 306138

Heat No. : See Attached List

Packing Slip No. : See Attached List

Page No. : 1 of 2

Material Description

Material Form : Bronze bar
Alloy : AB2



Typical Chemical Composition: (All values in %)

Cu	Sn	Pb	Zn	Fe	Al	Mn	Ni	Sb	Si	P	As	S
Bal	< 0.01	< 0.03	< 0.3	4.8	9.4	0.4	4.9	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.01	< 0.05

Method Of Analysis: O. E. Spectrometer



Mechanical Results (Typical)

Tensile Strength	Yield Strength	Elongation	Hardness BHN
MPa	MPa	%	
700 MPa	280 MPa	15	170

Made in NEW ZEALAND



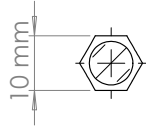
John Hastie

Quality and Metallurgy Manager

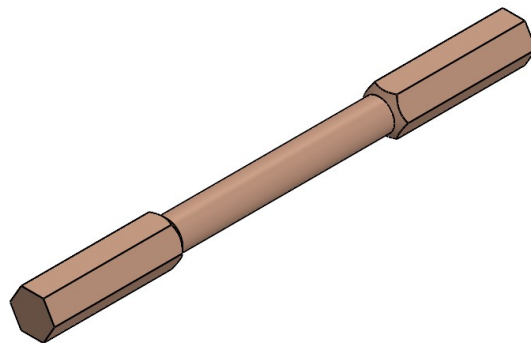
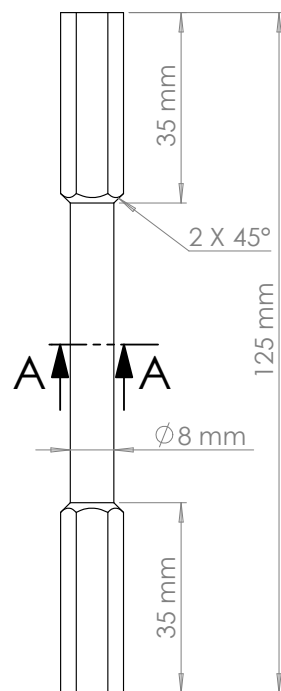
AW Fraser Ltd www.awfraser.co.nz info@awfraser.co.nz Telephone 64 3 341 0027 Fax 64 3 348 0457
39 Lunns Road Middleton Christchurch 8024 PO Box 6055 Christchurch 8442 New Zealand



Anexo 4. Plano de las probetas a mecanizar.



SECCIÓN A-A
ESCALA 1 : 1



Tratamiento térmico:	NA	Material:	Bronce	Dim. brutas:	1170 x 12.7 mm
Recubrimiento:	NA		Diseño:		Tusa Malla Darian
CARRERA DE INGENIERIA MECANICA	UPS	Dibujó:	Tusa Malla Darian	26-06-2025	
		Revisó:	Ing. Vaca Xavier	26-06-2025	
PROBETA	Escala: 1:1	Código:	01.4526.00	Tol. Gral.:	± 0.1

Producto SOLIDWORKS Educational. Solo para uso en la enseñanza.

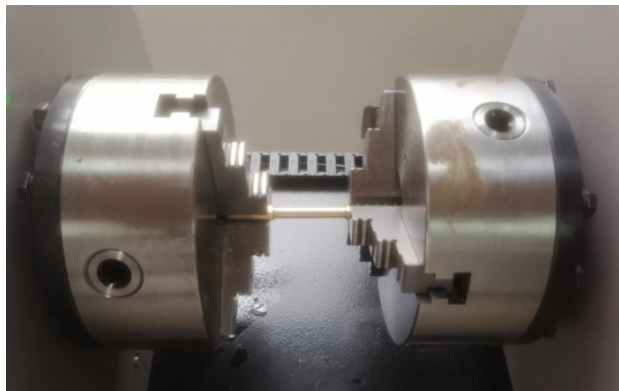
Anexo 5. Probetas para el mecanizado de la longitud calibrada.



Anexo 6. Primeras muestras para medir la rugosidad.



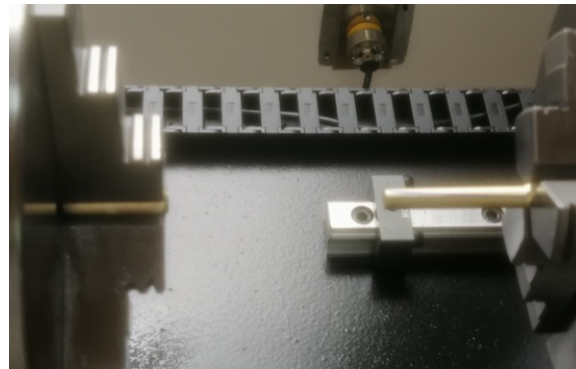
Anexo 7. Probeta ajustada para el ensayo a torsión.



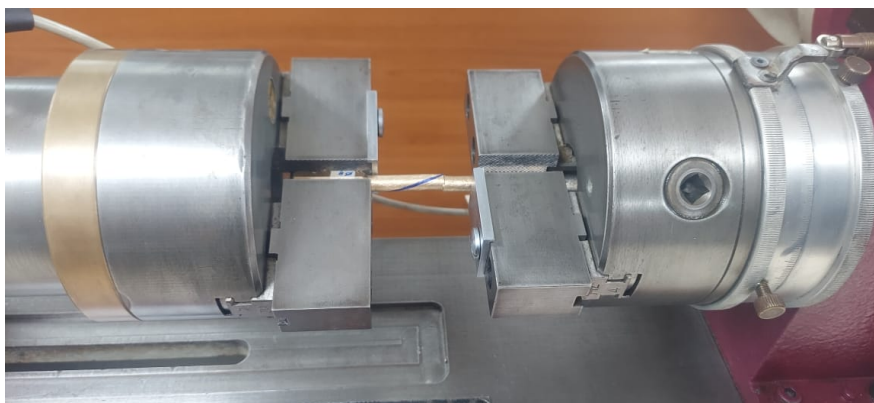
Anexo 8. Proceso del ensayo de las 6 primeras muestras.



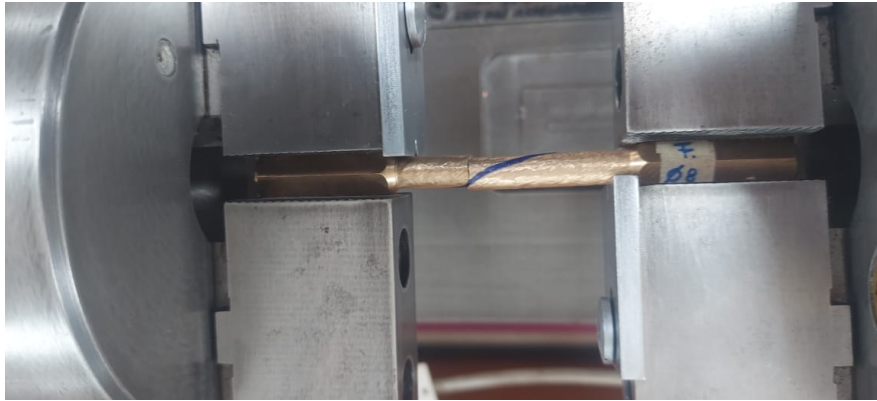
Anexo 9. Probeta N10 luego del ensayo a torsión.



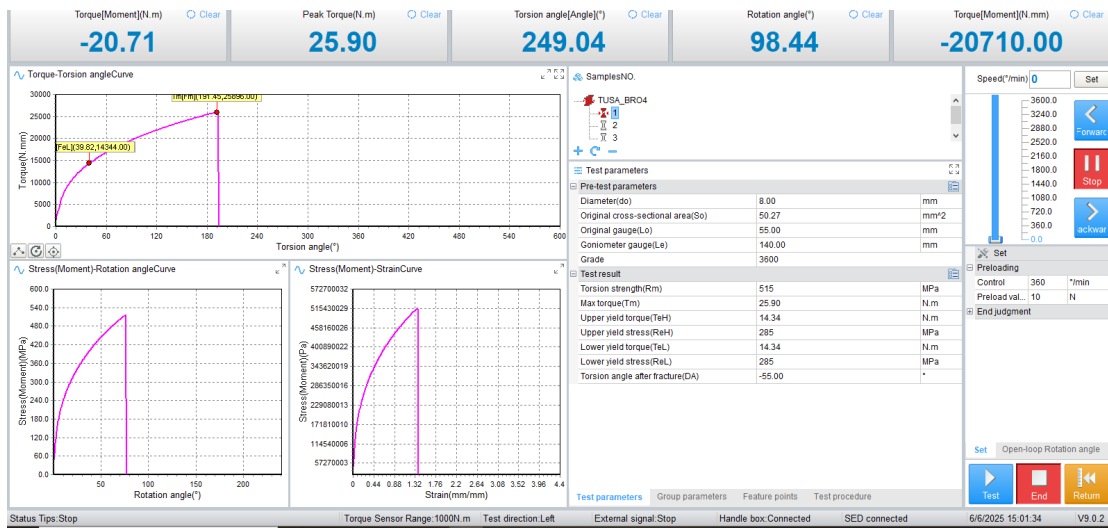
Anexo 10. Ensayo de la probeta en Cuenca.



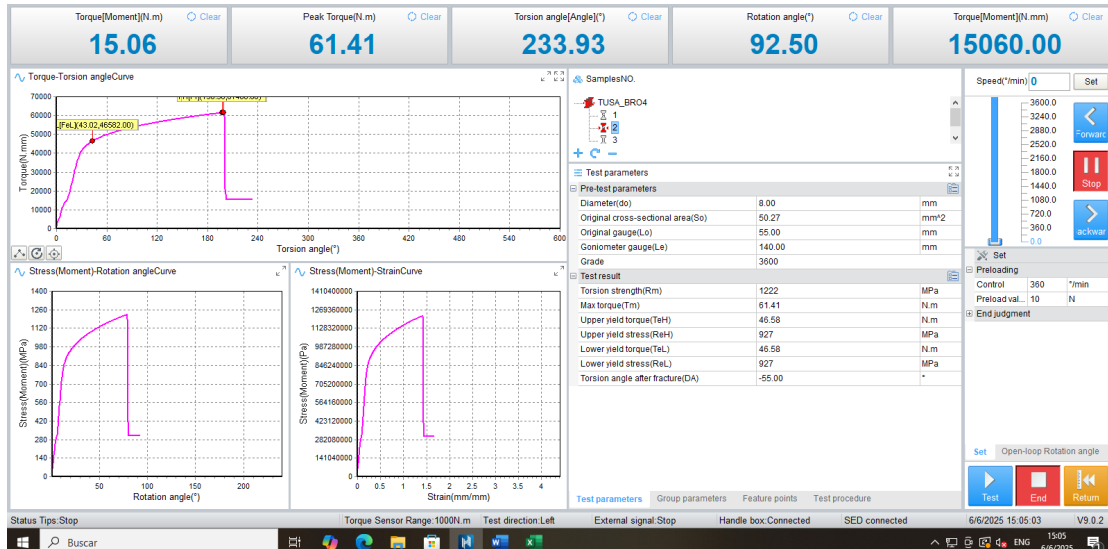
Anexo 11. Falla de la probeta N7 de bronce fosfórico.



Anexo 12. Resultados del ensayo a torsión.



Anexo 13. Resultados del ensayo a torsión.



Anexo 14. Resultados del ensayo a torsión.

