



**DEPARTAMENTO DE CIENCIAS DE LA ENERGÍA
Y MECÁNICA**

CARRERA DE INGENIERÍA MECÁNICA

**TRABAJO DE TITULACIÓN PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL
TÍTULO DE INGENIERO MECÁNICO**

**TEMA: “ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA DE MASA Y EL CALOR
GENERADO EN UN PAR DE FRICCIÓN BRONCE ACERO
SOMETIDO A ENERGÍA MECÁNICA DE FRICCIÓN”**

AUTORES:

NÚÑEZ MORALES, JUAN SEBASTIÁN

PAREDES PAREDES, LUIS FERNANDO

DIRECTOR ING. ANDRADE VÍCTOR

**SANGOLQUÍ - ECUADOR
2016**



CERTIFICADO DE ELABORACIÓN DEL PROYECTO

El trabajo titulado **“ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA DE MASA Y EL CALOR GENERADO EN UN PAR DE FRICCIÓN BRONCE ACERO SOMETIDO A ENERGÍA MECÁNICA DE FRICCIÓN”**, fue realizado en su totalidad por: Núñez Morales Juan Sebastián y Paredes Paredes Luis Fernando, como requerimiento parcial para la obtención del título de Ingeniería Mecánica, el mismo cumple con todos los requisitos teóricos, científicos, técnicos, metodológicos y legales establecidos por la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE, por lo tanto me permito acreditar y autorizar a los señores Núñez Morales Juan Sebastián y Paredes Paredes Luis Fernando para que lo sustenten públicamente.

Sangolquí, Miércoles 27 de Abril del 2016



ING. VÍCTOR ANDRADE

Director



DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD

Núñez Morales, Juan Sebastián

Paredes Paredes, Luis Fernando

DECLARAMOS QUE:

El trabajo de titulación “ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA DE MASA Y EL CALOR GENERADO EN UN PAR DE FRICCIÓN BRONCE ACERO SOMETIDO A ENERGÍA MECÁNICA DE FRICCIÓN”, ha sido desarrollada con base a una investigación exhaustiva, respetando derechos intelectuales de terceros, conforme a las citas y notas que constan en los párrafos correspondientes, cuyas fuentes se incorporan en la bibliografía.

Consecuentemente, este trabajo es de nuestra autoría.

En virtud de esta declaración, nos responsabilizamos del contenido, veracidad y alcance científico del proyecto de grado misión.

Sangolquí, Miercoles 27 de Abril del 2016.

Núñez Morales Juan Sebastián.

C.I. 100368300-8

Paredes Paredes Luis Fernando.

C.I. 172009516-3



AUTORIZACIÓN

Núñez Morales, Juan Sebastián

Paredes Paredes, Luis Fernando

AUTORIZAMOS:

Nosotros, Núñez Morales Juan Sebastián y Paredes Paredes Luis Fernando, autorizamos a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE la publicación en la biblioteca virtual de la institución el trabajo de titulación: **“ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA DE MASA Y EL CALOR GENERADO EN UN PAR DE FRICCIÓN BRONCE ACERO SOMETIDO A ENERGÍA MECÁNICA DE FRICCIÓN”**, cuyo contenido, ideas y criterios son de nuestra exclusiva responsabilidad de autoría.

Sangolquí, Miercoles 27 de Abril del 2016.

Núñez Morales Juan Sebastián.

C.I. 100368300-8

Paredes Paredes Luis Fernando.

C.I. 172009516-3

AGRADECIMIENTO

A mi familia por el apoyo incondicional a lo largo de mi vida universitaria. A mi padre, que con su amor y paciencia me formó para superar cada obstáculo con dedicación y responsabilidad, a mi madre hermosa por su entrega y preocupación, por brindarme una educación de calidad, por enseñarme a no rendirme y a superarme cada día.

Al Ingeniero José Guasumba, por incentivar la investigación y el desarrollo de nuevas tecnologías de generación de energía.

A la Empresa Santa Bárbara E.P por brindarnos todas las facilidades para desarrollar el presente proyecto de investigación.

Juan Sebastián

DEDICATORIA

A mi familia, en especial a mis amados padres por su amor y esfuerzo, por brindarme su apoyo incondicional en todo momento a pesar de la distancia. A José David mi hermano por quien me supero cada día.

Juan Sebastián

AGRADECIMIENTO

Es grato utilizar este espacio para expresar mis más sinceros agradecimientos a las personas e instituciones que de manera directa o indirecta han contribuido para llegar a cumplir este objetivo.

Al Ingeniero Víctor Andrade, como director de esta tesis quien nos ha ayudado proporcionándonos las mejores vías de realización de este proyecto.

Al Ingeniero José Guasumba, un agradecimiento especial ya que nos ha ayudado con los métodos correctos para llevar a cabo y cumplir el objetivo del presente proyecto.

A la Empresa Santa Bárbara E.P quien nos ha brindado su apoyo prestándonos y alquilándonos el torno en el que se llevó a cabo el experimento y todas las herramientas necesarias para el manejo correcto de este durante el proceso. Además, a sus trabajadores y en especial al Ingeniero Pablo Figueroa quien estuvo atento con muchos consejos de correcta utilización de los equipos y maquinaria de esta prestigiosa fábrica.

De manera general a la Universidad de las Fuerzas Armadas ESPE ya que en ella nos formamos como profesionales a lo largo de la vida estudiantil, de la misma manera en este proyecto utilizamos 4 de sus laboratorios. Un agradecimiento a los jefes de laboratorio y ayudantes ya que ellos nos prestaron ciertos equipos necesarios para continuar con el proceso.

Por supuesto, un agradecimiento profundo a mi familia. Sin su apoyo, colaboración e inspiración habría sido imposible llegar a estos momentos importantes de mi vida profesional.

Luis Fernando

DEDICATORIA

A mis padres Jeaneth y Edmundo por su amor, cariño y soporte para llegar a estas instancias. A mis hermanos Marcela, Cecilia y Santiago que han brindado todo su apoyo para llegar a este objetivo.

Luis Fernando

ÍNDICE DE CONTENIDOS

CARÁTULA	
CERTIFICADO DE ELABORACIÓN DEL PROYECTO	ii
DECLARACIÓN DE RESPONSABILIDAD	iii
AUTORIZACIÓN	iv
AGRADECIMIENTO	v
DEDICATORIA	vi
AGRADECIMIENTO	vii
DEDICATORIA	viii
ÍNDICE	ix
ÍNDICE DE FIGURAS	xv
ÍNDICE DE TABLAS	xix
RESUMEN	xxii
ABSTRACT	xxiii
1 CAPÍTULO I: GENERALIDADES	1
1.1 INTRODUCCIÓN	1
1.2 ANTECEDENTES	1
1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA	3
1.4 OBJETIVOS	3
1.4.1 OBJETIVO GENERAL	3
1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS	4
1.5 ALCANCE	4

		x
1.6	JUSTIFICACIÓN	4
2	CAPÍTULO II: FUNDAMENTOS TEÓRICOS	6
2.1	TRIBOLOGÍA	6
2.1.1	FRICCIÓN	6
2.1.1.1	MECANISMOS DE FRICCIÓN Y DESLIZAMIENTO	7
2.1.1.2	MATERIALES	8
2.1.1.3	APLICACIONES	8
2.1.2	DESGASTE	9
2.1.2.1	TIPOS DE DESGASTE	9
2.2	TRANSFERENCIA DE CALOR	11
2.2.1	TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN	11
2.2.1.1	CONDUCTIVIDAD TÉRMICA	12
2.2.1.2	DIFUSIVIDAD	12
2.2.1.3	CONDUCCIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO Y TRANSITORIO	12
2.2.2	TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN	15
2.2.2.1	CONVECCIÓN NATURAL	16
2.2.2.2	CONVECCIÓN FORZADA	16
2.2.2.3	COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR	16
2.2.2.4	ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA EJES ROTATORIOS	17
2.2.3	TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN	18
2.2.3.1	COEFICIENTE DE RADIACIÓN:	20
2.3	CALOR PRODUCIDO POR FRICCIÓN	20
2.3.1	CALOR DE FRICCIÓN	20
2.3.2	TEMPERATURA DE CONTACTO	22
2.3.2.1	CONTACTO ENTRE DOS SÓLIDOS SEMI INFINITOS	22
2.4	ESFUERZOS MECÁNICOS PRODUCIDOS POR FRICCIÓN	24
2.4.1	COMBINACIÓN DE ESFUERZOS	26
2.4.2	FACTORES QUE MODIFICAN LA RESISTENCIA A LA FATIGA.	27
2.4.3	ESFUERZOS PRODUCIDOS POR PRESIÓN INTERNA	29
2.5	DILATACIÓN TÉRMICA	29
2.5.1	ESFUERZOS TÉRMICOS	29
2.5.2	LEY DE DUHAMEL NEUMANN	30

2.6	TRATAMIENTO TÉRMICO.	32
2.6.1	MICRO CONSTITUYENTES.	33
2.6.1.1	TRANSFORMACIONES DE AUSTENITA.	34
2.6.2	TRATAMIENTOS ISOTERMOS: CURVAS TTT.	34
2.6.2.1	TEMPLE	35
2.6.2.2	REVENIDO	35
2.6.2.3	RECOCIDO	36
2.6.2.4	NORMALIZADO	36
2.6.3	TRATAMIENTO CON ENFRIAMIENTO CONTÍNUO: CURVAS CCT	36
2.7	DISEÑO DE EXPERIMENTOS DE TAGUCHI	37
3	CAPÍTULO III: DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PROBETAS	39
3.1	PARÁMETROS GENERALES MECÁNICOS DEL EXPERIMENTO	39
3.1.1	INSTRUMENTACIÓN: CELDA DE CARGA	39
3.2	DISEÑO DE LA PROBETA DE ACERO	42
3.2.1	SELECCIÓN DE MATERIAL.	42
3.2.2	DISEÑO GEOMÉTRICO DE LA PROBETA DE ACERO	43
3.2.3	DISEÑO MECÁNICO	44
3.2.3.1	PARÁMETROS	44
3.2.3.2	CÁLCULOS	45
3.2.4	TRATAMIENTO TÉRMICO DE LA PROBETA DE ACERO ARNE DF2	54
3.2.4.1	TEMPLE	55
3.2.4.2	REVENIDO	55
3.3	DISEÑO DE LA PROBETA DE BRONCE.	57
3.3.1	SELECCIÓN DE MATERIAL	57
3.3.2	DISEÑO GEOMÉTRICO	58
3.3.3	DISEÑO MECÁNICO	59
3.4	DISEÑO DEL ANILLO DE SUJECIÓN.	61
3.4.1	MATERIAL SELECCIONADO	61
3.4.2	DISEÑO GEOMÉTRICO	62
3.4.3	DISEÑO MECÁNICO	63
3.5	DISEÑO DE LA CHAVETA	65
3.5.1	MATERIAL SELECCIONADO	65
3.5.2	DISEÑO GEOMÉTRICO	66
3.5.3	DISEÑO MECÁNICO	66

3.6	DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE LOS PINES DE LA LUNETA.	68
3.7	SELECCIÓN DE LA CELDA DE CARGA	69
3.8	FORMA DE MONTAJE	70
3.9	SIMULACIÓN MECÁNICA	72
3.9.1	SIMULACIÓN GENERAL DEL SISTEMA	72
3.9.2	SIMULACIÓN A FATIGA DE LA PROBETA DE ACERO	82
3.9.3	SIMULACIÓN A COMPRESIÓN DE LA PROBETA DE BRONCE.	84
4	ANÁLISIS TÉRMICO DEL SISTEMA DE FRICCIÓN	89
4.1	PARÁMETROS GENERALES TÉRMICOS DEL EXPERIMENTO	89
4.2	DISEÑO TÉRMICO	91
4.2.1	DETERMINACIÓN DEL CALOR GENERADO POR FRICCIÓN	91
4.2.2	DETERMINACIÓN DEL CALOR TRANSFERIDO AL BRONCE	93
4.2.2.1	COEFICIENTE DE CONVENCION FORZADA FLUJO EXTERNO	93
4.2.2.2	COEFICIENTE DE RADIACIÓN	94
4.2.2.3	BALANCE ENERGÉTICO PARA EL BRONCE	94
4.2.2.4	CALOR TOTAL PERDIDO EN EL BRONCE	97
4.2.3	DETERMINACIÓN DEL CALOR TRANSFERIDO AL ACERO	97
4.2.3.1	ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA EJES ROTATORIOS	98
4.2.3.2	COEFICIENTE DE RADIACIÓN	100
4.2.3.3	BALANCE ENERGÉTICO PARA EL ACERO	100
4.2.3.4	CALOR TOTAL PERDIDO EN EL ACERO	101
4.2.4	CALOR TOTAL PERDIDO EN EL SISTEMA	102
4.3	ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR DEL PAR DE FRICCIÓN PARA EL ESTADO TRANSITORIO Y ESTACIONARIO	103
4.3.1	ESTADO TRANSITORIO	103
4.3.1.1	BALANCE TÉRMICO	104
4.3.1.2	SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DEL CALOR POR SEPARACIÓN DE VARIABLES	105
4.3.1.3	ECUACIÓN DEL CALOR PARA EL BRONCE	111
4.3.1.4	ECUACIÓN DEL CALOR PARA EL ACERO	114

4.3.2	ESTADO ESTACIONARIO	117
4.3.2.1	SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DEL CALOR PA- RA EL BRONCE EN ESTADO ESTACIONARIO .	117
4.3.2.2	SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DEL CALOR PA- RA EL ACERO EN ESTADO ESTACIONARIO . .	120
4.4	TEMPERATURA DE CONTACTO	122
4.5	SIMULACIÓN TÉRMICA DEL SISTEMA	123
4.5.1	SIMULACIÓN TÉRMICA DEL ESTADO TRANSITORIO EN LA PROBETA DE BRONCE	123
4.5.2	SIMULACIÓN TÉRMICA DEL ESTADO TRANSITORIO EN LA PROBETA DE ACERO	127
5	CAPÍTULO IV: ANÁLISIS DE RESULTADOS	131
5.1	EXPERIMENTOS	133
5.1.1	EXPERIMENTO 1	133
5.1.2	EXPERIMENTO 2	139
5.1.3	EXPERIMENTO 3	144
5.1.4	EXPERIMENTO 4	148
5.1.5	EXPERIMENTO 5	154
5.1.6	EXPERIMENTO 6	159
5.1.7	EXPERIMENTO 7	164
5.1.8	EXPERIMENTO 8	168
5.1.9	EXPERIMENTO 9	173
5.2	RESULTADOS	178
5.2.1	CALOR PERDIDO EN LA PROBETA DE BRONCE-ANILLO	178
5.2.1.1	CALOR PERDIDO EN EL ANILLO SUJETADOR	178
5.2.1.2	CALOR PERDIDO EN LA PROBETA DE BRONCE	178
5.2.2	CALOR PERDIDO EN LA PROBETA DE ACERO	179
5.2.3	CALOR GENERADO POR FRICCIÓN	181
5.2.4	RESULTADOS POR EXPERIMENTO	182
5.2.4.1	EXPERIMENTO 1	182
5.2.4.2	EXPERIMENTO 2	182
5.2.4.3	EXPERIMENTO 3	183
5.2.4.4	EXPERIMENTO 4	183
5.2.4.5	EXPERIMENTO 5	184
5.2.4.6	EXPERIMENTO 6	184
5.2.4.7	EXPERIMENTO 7	185
5.2.4.8	EXPERIMENTO 8	185

5.2.4.9	EXPERIMENTO 9	186
5.3	ANÁLISIS DE RESULTADOS	186
5.3.1	ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL CALOR GENERADO POR FRICCIÓN.	187
5.3.2	ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA MASA PERDIDA EN CADA EXPERIMENTO.	192
5.4	RESULTADOS METALOGRAFICOS	194
5.4.1	PROBETA DE ACERO DF2	194
5.4.1.1	MEDICIÓN DE DUREZA	196
5.4.2	PROBETA DE BRONCE DULCE UNS C38500	197
6	CAPÍTULO V: CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES	199
6.1	CONCLUSIONES	199
6.2	RECOMENDACIONES	202
	REFERENCIAS	202
	ANEXOS	205

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1	Área de Contacto entre Superficies de Fricción.	6
Figura 2	Adhesión Durante el Deslizamiento.	7
Figura 3	Deformación de las Zonas de Contacto.	8
Figura 4	Movimiento de Partículas Abrasivas.	10
Figura 5	Ejemplificación del Desgaste por Fatiga.	10
Figura 6	Chorro de Partículas Abrasivas.	11
Figura 7	Signos para la Transmisión de Calor por Conducción.	12
Figura 8	Paralelepípedo Elemental de Fluido.	13
Figura 9	Modelo de Generación de Calor por Fricción.	20
Figura 10	Contacto entre Dos Sólidos Semi infinitos.	22
Figura 11	Contacto entre superficies de fricción	23
Figura 12	Rectas con Criterios de Fallas.	28
Figura 13	Distribución no Lineal no Simétrica de Temperaturas.	31
Figura 14	Diagrama de Fase Hierro-Carbono.	33
Figura 15	Diagrama Temperatura Tiempo Transformación.	35
Figura 16	Temperatura de Revenido.	35
Figura 17	Curva de Enfriamiento Continuo.	36
Figura 18	Esquema de Conexión.	40
Figura 19	Circuito de Conexión Celda de Carga-Arduino UNO.	40
Figura 20	Conexión Protoboard.	41
Figura 21	Programa de Adquisición de Datos.	41
Figura 22	Adquisición y Visualización de Datos.	42
Figura 23	Diseño Geométrico de la Probeta de Acero.	44
Figura 24	Área Crítica de Diseño.	46
Figura 25	Módulo de Elasticidad del Bronce Dulce.	47
Figura 26	Área de Medición de la Fuerza (Celda de Carga).	49
Figura 27	Curso de la Temperatura en el Temple Ordinario.	55
Figura 28	Temperatura de Temple.	55
Figura 29	Temperatura de Revenido.	56
Figura 30	Diagrama TTT para ASSAB DF2.	57

Figura 31	Diseño Geométrico de la Probeta de Bronce.	59
Figura 32	Diseño Geométrico del Anillo de Sujeción.	63
Figura 33	Concentrador de Esfuerzo para Elementos Sometido a Tracción.	65
Figura 34	Fuerza Cortante.	66
Figura 35	Esfuerzo Cortante Presente en la Chaveta.	67
Figura 36	Simulación del Ensamble Completo.	72
Figura 37	Información de Malla.	78
Figura 38	Registrador de Temperatura PCE-T 1200.	89
Figura 39	Anemómetro Digital CFM de EXTECH.	90
Figura 40	Termómetro Láser IR.	90
Figura 41	Distribución de las Termocuplas en la Probeta de Bronce.	90
Figura 42	Calor Generado por Fricción.	93
Figura 43	Balance Energético del Bronce.	95
Figura 44	Parámetros Dimensionales y Térmicos del Acero.	98
Figura 45	Balance Térmico del Acero.	101
Figura 46	Balance Energético Total del Sistema.	102
Figura 47	Balance Térmico del Par de Fricción Bronce-Acero.	103
Figura 48	Estado Transitorio para el Bronce del Experimento 4.	114
Figura 49	Estado Transitorio para el Acero Experimento 4.	117
Figura 50	Temperatura de Contacto.	122
Figura 51	Simulación del Ensamble Bronce UNS C35800 - Anillo Sujetador.	123
Figura 52	Mallado de la Probeta de Bronce-Anillo.	126
Figura 53	Simulación del Modelo Acero DF2.	127
Figura 54	Mallado del Sólido de la Probeta Acero DF2.	129
Figura 55	Esquema General del Experimento.	131
Figura 56	Perfil de Temperaturas Bronce UNS C35800 Experimento 1.	136
Figura 57	Simulación Térmica Bronce UNS C35800 Experimento 1.	136
Figura 58	Perfil de Temperaturas Acero DF2 Experimento 1.	138
Figura 59	Simulación Térmica Acero DF2 Experimento 1.	138
Figura 60	Perfil de Temperaturas Bronce UNS C35800 Experimento 2.	141
Figura 61	Simulación Térmica Bronce UNS C35800 Experimento 2.	142
Figura 62	Perfil de Temperaturas Acero DF2 Experimento 2.	143
Figura 63	Simulación Térmica Acero DF2 Experimento 2.	143
Figura 64	Perfil de Temperaturas Bronce UNS C35800 Experimento 3.	146
Figura 65	Simulación Térmica Bronce UNS C35800 Experimento 3.	147

Figura 66	Perfil de Temperaturas Acero DF2 Experimento 3.	148
Figura 67	Simulación Térmica Acero DF2 Experimento 3.	148
Figura 68	Perfil de Temperaturas Bronce UNS C35800 Experimento 4. . .	151
Figura 69	Simulación Térmica Bronce UNS C35800 Experimento 4. . .	152
Figura 70	Perfil de Temperaturas Acero DF2 Experimento 4.	153
Figura 71	Simulación Térmica Acero DF2 Experimento 4.	153
Figura 72	Perfil de Temperaturas Bronce UNS C35800 Experimento 5. .	156
Figura 73	Simulación Térmica Bronce UNS C35800 Experimento 5 . . .	157
Figura 74	Perfil de Temperaturas Acero DF2 Experimento 5.	158
Figura 75	Simulación Térmica Acero DF2 Experimento 5.	158
Figura 76	Perfil de Temperaturas Bronce UNS C35800 Experimento 6. .	161
Figura 77	Simulación Térmica Bronce UNS C35800 Experimento 6. . .	162
Figura 78	Perfil de Temperaturas Acero DF2 Experimento 6.	163
Figura 79	Simulación Térmica Acero DF2 Experimento 6.	163
Figura 80	Perfil de Temperaturas Bronce UNS C35800 Experimento 7. .	166
Figura 81	Simulación Térmica Bronce UNS C35800 Experimento 7. . .	167
Figura 82	Perfil de Temperaturas Acero DF2 Experimento 7.	168
Figura 83	Simulación Térmica Acero DF2 Experimento 7.	168
Figura 84	Perfil de Temperaturas Bronce UNS C35800 Experimento 8. .	170
Figura 85	Simulación Térmica Bronce UNS C35800 Experimento 8. . .	171
Figura 86	Perfil de Temperaturas Acero DF2 Experimento 8.	172
Figura 87	Simulación Térmica Acero DF2 Experimento 8.	172
Figura 88	Perfil de Temperaturas Bronce UNS C35800 Experimento 9. .	175
Figura 89	Simulación Térmica Bronce UNS C35800 Experimento 9. . .	176
Figura 90	Perfil de Temperaturas Acero DF2 Experimento 9.	177
Figura 91	Simulación Térmica Acero DF2 Experimento 9.	177
Figura 92	Resultados y Variables Involucradas.	188
Figura 93	Fuerza de Aplastamiento Vs Calor Generado.	188
Figura 94	Velocidad de Rotación Vs Calor Generado.	189
Figura 95	Áreas de las Variables y Resultado Obtenido.	190
Figura 96	Calor Generado y Masa Perdida.	191
Figura 97	Pérdida de Masa y Variables Involucradas.	193
Figura 98	Gráfica de Temperatura vs Tiempo.	194
Figura 99	Micrografía Inicial Acero DF2 Iván Bohman.	195
Figura 100	Micrografía Acero AISI 01.	195
Figura 101	Micrografía Acero DF2 después de los Experimentos.	196
Figura 102	Posiciones de las Mediciones.	196
Figura 103	Variación de la Dureza.	197

Figura 104	Lámina de Metal de Muntz Laminada en Caliente	197
Figura 105	Probeta de Bronce Inicial UNS C38500 (Experimentos 1-2-3).	198
Figura 106	Probeta de Bronce UNS C38500 (Experimentos 7-8).	198

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1	Valores de Emisividad de Materiales Comunes.	19
Tabla 2	Matriz de Decisión para Selección del Material de la Probeta de Acero.	42
Tabla 3	Propiedades Mecánicas del Acero DF2.	43
Tabla 4	Factores a y b para Diferentes Maquinados.	52
Tabla 5	Factores de Corrección por Temperatura.	53
Tabla 6	Matriz de Decisión para Selección del Material de la Probeta de Bronce.	58
Tabla 7	Propiedades Mecánicas del Bronce UNS C35800.	58
Tabla 8	Propiedades Mecánicas del Acero SAE 1024.	62
Tabla 9	Propiedades Mecánicas del Acero AISI 1018.	65
Tabla 10	Información del Ensamble.	73
Tabla 11	Propiedades de los Materiales en el Ensamble.	74
Tabla 12	Cargas y Sujeciones del Ensamble.	76
Tabla 13	Información de Contacto.	77
Tabla 14	Información de Malla.	78
Tabla 15	Esfuerzos Combinados.	79
Tabla 16	Desplazamientos del Ensamble.	79
Tabla 17	Deformaciones Unitarias.	80
Tabla 18	Factor de Seguridad de la Probeta de Acero.	81
Tabla 19	Factor de Seguridad de la Chaveta.	81
Tabla 20	Factor de Seguridad de los Pines.	82
Tabla 21	Propiedades de Estudio de la Probeta de Acero.	83
Tabla 22	Propiedades de la Probeta de Acero.	83
Tabla 23	Factor de Seguridad de la Probeta de Acero Sometido a Fatiga.	84
Tabla 24	Cargas y Sujeciones de la Probeta de Bronce.	85
Tabla 25	Esfuerzo Combinado de Von Mises para la Probeta de Bronce.	86
Tabla 26	Desplazamientos de la Probeta de Bronce.	86
Tabla 27	Deformación Unitaria Equivalente de la Probeta de Bronce.	87
Tabla 28	Factor de Seguridad de la Probeta de Bronce.	88

Tabla 29	Propiedades Térmicas del Acero DF2.	91
Tabla 30	Propiedades Térmicas del Bronce Dulce.	91
Tabla 31	Información del Modelo Bronce-Anillo-Chaveta..	124
Tabla 32	Propiedades del Estudio de la Probeta de Bronce.	124
Tabla 33	Propiedades de la Probeta de Bronce-Anillo-Chaveta.	125
Tabla 34	Cargas Térmicas en la Probeta de Bronce-Anillo-Chaveta.. . . .	125
Tabla 35	Información del Contacto Probeta de Bronce-Anillo.	126
Tabla 36	Resultados del Estudio de la Probeta de Bronce-Anillo.	127
Tabla 37	Información del Modelo de la Probeta de Acero.	128
Tabla 38	Propiedades del Estudio de la Probeta de Acero.	128
Tabla 39	Propiedades del Material de la Probeta de Acero.	128
Tabla 40	Cargas Térmicas en la Probeta de Acero.	129
Tabla 41	Resultados del Estudio de la Probeta de Acero.	130
Tabla 42	Arreglo Ortogonal L9.	132
Tabla 43	Arreglo L9 con Datos del Experimento.	132
Tabla 44	Variables Medidas Experimento 1.	133
Tabla 45	Temperatura-Bronce UNS C35800 Experimento 1.	134
Tabla 47	Temperatura-Acero DF2 Experimento 1.	137
Tabla 49	Variables Medidas Experimento 2.	139
Tabla 50	Temperaturas-Bronce UNS C35800 Experimento 2.	139
Tabla 52	Temperatura-Acero DF2 Experimento 2.	142
Tabla 54	Variables Medidas Experimento 3.	144
Tabla 55	Temperatura-Bronce UNS C35800 Experimento 3.	144
Tabla 57	Temperaturas-Acero DF2 Experimento 3.	147
Tabla 59	Variables Medidas Experimento 4.	149
Tabla 60	Temperaturas-Bronce UNS C35800 Experimento 4.	149
Tabla 62	Temperaturas-Acero DF2 Experimento 4.	152
Tabla 64	Variables Medidas Experimento 5.	154
Tabla 65	Temperatura-Bronce UNS C35800 Experimento 5.	154
Tabla 67	Temperatura-Acero DF2 Experimento 5.	157
Tabla 69	Variables Medidas Experimento 6.	159
Tabla 70	Temperatura-Bronce UNS C35800 Experimento 6.	159
Tabla 72	Temperatura-Acero DF2 Experimento 6.	162
Tabla 74	Variables Medidas Experimento 7.	164
Tabla 75	Temperatura-Bronce UNS C35800 Experimento 7.	164
Tabla 77	Temperatura-Acero DF2 Experimento 7.	167
Tabla 79	Variables Medidas Experimento 8.	169

Tabla 80	Temperatura-Bronce UNS C35800 Experimento 8.	169
Tabla 82	Temperatura-Acero DF2 Experimento 8.	171
Tabla 84	Variabes Medidas Experimento 9.	173
Tabla 85	Temperatura-Bronce UNS C35800 Experimento 9.	173
Tabla 87	Temperatura-Acero DF2 Experimento 9.	176
Tabla 89	Calor Perdido en el Anillo.	178
Tabla 91	Parámetros Térmicos Resultantes para el Bronce UNS C38500.	179
Tabla 93	Calor Perdido en la Probeta de Bronce	179
Tabla 95	Propiedades del Aire para cada Experimento.	180
Tabla 97	Parámetros Térmicos Resultantes para el Acero DF2.	180
Tabla 99	Calor Perdido en la Probeta de Acero.	181
Tabla 101	Calor Generado por Fricción.	181
Tabla 103	Resultados Experimento 1.	182
Tabla 104	Resultados Experimento 2.	182
Tabla 105	Resultados Experimento 3.	183
Tabla 106	Resultados Experimento 4.	183
Tabla 107	Resultados Experimento 5.	184
Tabla 108	Resultados Experimento 6.	184
Tabla 109	Resultados Experimento 7.	185
Tabla 110	Resultados Experimento 8.	185
Tabla 111	Resultados Experimento 9.	186
Tabla 112	Parámetros y Resultados de Cada Experimento.	186
Tabla 113	Análisis de Resultados para el Calor Generado.	187
Tabla 114	Análisis de Resultados para Pérdida de Masa.	192
Tabla 115	Datos Promedios de la Dureza Medida para el Acero DF2.	196

RESUMEN

Esta investigación desarrolla un experimento que determina y analiza la tasa de pérdida de masa por unidad de calor generado de un par de fricción bronce-acero. Para lograr este objetivo se selecciona probetas de acero DF2 y de bronce UNS C38500 a partir de sus propiedades de dureza. Se diseñan las dos piezas para resistir esfuerzos térmicos, esfuerzos de torsión y aplastamiento, se diseña el sistema de sujeción para que la probeta de bronce permanezca estática mediante un sistema de anclaje a la bancada mientras que la probeta de acero gira conjuntamente con el mandril formando un contacto perpendicular al eje axial. El experimento se lleva a cabo en un torno de 10 CV de capacidad con diferentes velocidades de rotación y se aplica diferentes fuerzas de aplastamiento, en donde la temperatura se mide con 11 termocuplas instaladas en la superficie de la probeta de bronce. Estas termocuplas envían una señal al equipo PCE-T 1200 el cual guarda los valores en una tarjeta micro SD. La temperatura del acero se lee con un termómetro láser IR. La fuerza de aplastamiento se mide con una celda de carga que emite una señal eléctrica a un adquisidor de datos Arduino UNO y vista en pantalla con un ordenador portátil a través de un programa. Otras variables son medidas como la velocidad del viento y la temperatura ambiente. Con todas estas variables se desarrolla la ecuación diferencial parcial para el calor por conducción en la probeta de bronce y acero. Se utiliza un arreglo ortogonal L9 de Taguchi para definir los experimentos y se concluye los mejores resultados, obteniendo que la tasa de pérdida de masa fue mínima cuando se usa una velocidad de rotación de 250 rpm y una fuerza de aplastamiento inicial de 250 kg a 350 kg con torques adecuados de 140 Nm a 250 Nm implementados en un sistema que evite el descentramiento y que regule las fuerzas que se producen por dilatación en la dirección axial.

PALABRAS CLAVE:

- **FRICCIÓN**
- **DESGASTE**
- **CALOR**
- **TAGUCHI**

ABSTRACT

This research develops an experiment to determine the rate of loss mass per unit of heat generated in a pair of brass-steel friction. To achieve this goal, specimens DF2 steel and UNS C38500 brass are selected from its hardness. The two pieces are designed to resist twisting and crushing strain. The system is designed to keep the brass specimen static by a fastening system. The fastening system is fixedly attached to the bench at the same time as the steel specimen rotates together with the lathe chuck. The brass and the steel have a contact and it is perpendicular to the axial axis. The experiment is made on a lathe 10 CV of capacity with different rotation speeds and different crushing forces. The temperature is measured with 11 thermocouples installed on the surface of the brass specimen. These thermocouples are read by the PCE-T 1200 equipment which stores all the values in a micro SD card, and the steel temperature is read by a IR laser thermometer. On the other hand, the crushing force is measured with a load cell and it emits an electrical signal to a data acquisition Arduino ONE. Later, this signal is viewed on a laptop screen through a program. Other variables are measured as wind speed and ambient temperature. Finally, all of these variables develops the partial differential equation for conductive heat of brass and steel specimens. An orthogonal array L9 Taguchi is used to define the experiments and the best results are concluded. The experiment gave the rate of mass loss is minimal when a rotation speed of 250 rpm is used and initial crush strength of 250 kg to 350 kg with appropriate torques of 140 Nm to 250 Nm implemented in a system that avoid runout and regulating the forces produced by expansion in the axial direction.

KEY WORDS:

- FRICTION
- WEAR
- HEAT
- TAGUCHI

CAPÍTULO 1

GENERALIDADES

1.1 INTRODUCCIÓN

El desarrollo de la civilización humana ha llevado a la búsqueda constante de nuevas formas de energía con eficiencias considerablemente altas, es así como la fricción de materiales en diferentes aplicaciones es considerada como pérdida de energía en forma de calor. Sin embargo, estudios previos buscan el aprovechamiento de esta fuente de energía.

El siguiente estudio muestra la fricción de dos materiales particulares que producen calor al estar en contacto bajo ciertos parámetros como fuerza de aplastamiento, revoluciones por minuto del componente giratorio y tiempo. Estos parámetros determinarán la cantidad de masa perdida de los materiales sometidos a la fricción.

La fricción de dos materiales accionados por fuentes de energía renovable como energía hidráulica o su similar energía eólica busca la generación de calor útil, así se establece el propósito de estudio como la determinación del calor generado y la tasa de pérdida de masa de los materiales bronce y acero a través de un análisis térmico y mecánico de las probetas de fricción.

1.2 ANTECEDENTES

En las investigaciones realizadas sobre el rozamiento y sus efectos, se puede indicar los trabajos de Ziuota, A., et al, (2011), donde se determina la influencia de las pérdidas por fricción en rodamientos de rodillos.

Se menciona la investigación numérica de las condiciones de lubricación en chumaceras hidrodinámicas con el efecto del desalineamiento del eje dado en el trabajo de [Antonio-García et al., 2013].

El análisis térmico de la fricción [Tieu et al., 2006], utiliza emulsiones en cintas de rodadura. Se realiza un análisis térmico integral de laminación en frío en un régimen de película mixta, la fricción de ambos materiales produce un modelo térmico tomando

en cuenta la deformación plástica de los materiales involucrados.

En el desarrollo de materiales antifricción que estudia compuestos DOE/RSM, elaborado por [Xiao and Zhu, 2010] realiza ensayos de fricción en películas de molibdeno, bajo condiciones de vacío y criogénicas. Este estudio predice el comportamiento de los materiales sometidos a fricción longitudinal o radial.

Además, se ha determinado el consumo total de energía debido a la fricción en máquinas papeleras por [Holmberg et al., 2013] tomando en cuenta términos de fricción en motores, transmisiones, bombas, ventiladores, agitadores, tuberías y los sistemas de rodillos.

En la fricción hay que considerar la influencia de la fuerza normal y los modos de desgaste abrasivo, como es el caso de los ensayos de desgaste de rodamientos de bolas, realizado por [Cozza, 2014].

Para analizar las propiedades de fricción [Küçükömeroğlu and Kara, 2014] utiliza una aleación de Bronce $\text{CuZn}_{39}\text{Pb}_3$ bajo condiciones atmosféricas y de vacío. De igual manera este estudio analiza condiciones de desgaste.

El trabajo desarrollado por [Kchaou et al., 2013] analiza las características de fricción bajo diversas condiciones de frenado.

También se cita la determinación del tiempo en la etapa de calentamiento para obtener la unión de un aluminio AA 6063 soldado por fricción. La soldadura por fricción (FRW) tiene la finalidad de lograr uniones en materiales con perfiles cilíndricos que no pueden soldarse de forma convencional. El objetivo de esta investigación fue determinar el tiempo en la etapa de calentamiento para lograr unir barras de Aluminio AA 6063 soldado por FRW. Se realizaron pruebas a diferentes tiempos de calentamiento manteniendo constantes la presión y la velocidad. Se determinó que a mayor tiempo en la etapa de calentamiento se produce mayor fricción entre las barras lo que ocasiona mayor deformación plástica y aumento el porcentaje de unión. Por otro lado, el rango de tiempo en la etapa de calentamiento donde se obtuvo mayor porcentaje de unión se encuentra entre 140 y 180s alcanzando la unión completa de las barras a 160s. Además, la variación del avance del mandril en la etapa de forjado no produce un aumento significativo en el porcentaje de unión. El tiempo en la etapa de calentamiento demostró tener una gran influencia en el porcentaje de unión y calidad de la unión obteniéndose que a mayor tiempo en la etapa de calentamiento se produzca mayor fricción entre las barras lo que ocasiona que se produzca mayor deformación plástica y aumente el porcentaje de unión. La variación del avance del mandril en la etapa de forjado no produce un aumento significativo en el porcentaje de unión pero se consigue una unión completa con un avance de 10mm. El decaimiento presentado en el porcentaje de unión para las probetas realizadas a 180s en la etapa de calentamiento requiere de un estudio posterior a dicho tiempo que permita determinar el comportamiento del mismo. La di-

ferencia presente en el acortamiento axial se debe a la variación de la aplicación de la carga en el momento de forjado por parte del operador. La longitud de las probetas utilizadas para el ensayo de tracción no permitió obtener un resultado satisfactorio sobre la resistencia a la tracción.

En la Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE a partir de 1993, el profesor José Guasumba inicia con las pruebas de rozamiento para generar calor útil mediante ensayos de fricción de bronce, acero, aluminio, madera, grafito, cobre, entre otros. A partir de 1998 se realiza ensayos para vaporización del agua con probetas que contenían un pequeño recipiente y el par de fricción transmitía calor al fluido por conducción. En el año 2003 se construyen tres calderos con capacidades de 1.26 litros, 15 litros y 18 litros. Utilizando el caldero de menor capacidad se alcanzan temperaturas de proceso de hasta 400°C para el vapor.

1.3 DEFINICIÓN DEL PROBLEMA

No existe un análisis de la pérdida de masa y el calor generado en un par de fricción bronce acero sometido a energía mecánica de fricción. La fricción entre dos materiales, en este caso bronce-acero genera calor producido por contacto, presión de aplastamiento y la rotación generada a través de una máquina eólica, hidráulica o cualquier mecanismo que genere movimiento rotatorio a partir de energía renovable. Estas alimentarán cualquier demanda de energía mecánica de rotación en cualquier aplicación. Sin embargo, se ha establecido que la fricción de dos materiales provoca el desgaste de los mismos en una medida desconocida. Se determinará la masa perdida en cada uno de los materiales sometidos a la fricción por rotación en una aplicación la cual consiste en la generación de calor para usos externos.

La búsqueda exhaustiva de fuentes de energía alternativas a las convencionales lleva a este proyecto a la búsqueda del parámetro de pérdida de masa dentro del contexto de generación de calor por fricción el cual es importante para posteriores aplicaciones en donde se aproveche el calor generado en la fricción.

1.4 OBJETIVOS

1.4.1 OBJETIVO GENERAL

- Realizar el análisis de la pérdida de masa y el calor generado en un par de fricción bronce acero sometido a energía mecánica de fricción.

1.4.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Determinar la geometría de las probetas de bronce y de acero así como su dimensionamiento óptimo.
- Diseñar la estructura de sujeción de las probetas al mecanismo de rotación.
- Analizar los parámetros energéticos de los experimentos mediante los ensayos experimentales variando la fuerza de aplastamiento y la velocidad de rotación.

1.5 ALCANCE

A fin de analizar el calor generado en un par de fricción bronce - acero a coste de una masa desgastada, este proyecto de investigación empieza con el diseño y selección del material de las probetas a friccionarse con su respectiva construcción, estas probetas son tratadas térmicamente para modificar su resistencia y obtener los resultados mejores. Se usa un torno como fuente de energía para realizar el experimento ideal. Los parámetros se combinan mediante los procedimientos de Taguchi y se obtiene el número de experimentos a realizarse. Se llevan a cabo todos los experimentos en el torno y se escoge las combinaciones mejores, es decir, los que generan más calor con menos masa desgastada. En cada experimento, la probeta de bronce permanece estática y la de acero rota con el mandril del torno, cuyas temperaturas se miden mediante un termómetro láser en la probeta de acero y mediante diez termocuplas en la probeta de bronce. Se miden otras variables como: la velocidad del aire mediante un anemómetro digital, la rotación del mandril que se mide con un tacómetro en la parte posterior del eje del torno y la fuerza de aplastamiento mediante una celda de carga programada la cual se visualiza en la pantalla de un computador portátil. Las probetas se someten a metalografías y se analizan los cambios en la microestructura de las mismas, donde se determina aquel que genera más calor con menor tasa de desgaste. Todos los resultados se analizan mediante un estudio de varianza con el fin de determinar aquellas combinaciones de parámetros que produzcan resultados adecuados para el diseño de aplicaciones futuras.

1.6 JUSTIFICACIÓN

El presente proyecto de investigación busca el análisis del calor generado y la pérdida de masa de un par de fricción bronce acero sometido a energía mecánica de fricción, siendo esta investigación importante porque La Universidad de las Fuerzas Armadas - ESPE con su departamento de Energía y Mecánica busca nuevas formas de aprovechamiento del calor siendo la primera en la generación de energía de fricción y

patenta nuevos experimentos que en el futuro se convierten en aplicaciones para el uso de la sociedad. Para lo cual se realiza un proceso de investigación y experimentación para determinar valores cuantitativos con ensayos de variación de la fuerza de aplastamiento y la velocidad de rotación, estos ensayos permitirán evaluar cuanta masa de los diferentes materiales es consumida y qué cantidad de calor es producida por estos materiales en fricción enunciando recomendaciones para que en un futuro se pueda construir un caldero de fricción y otras aplicaciones. Mediante el análisis de los parámetros energéticos de los ensayos se podrá recomendar este método de generación de calor para aplicaciones varias. Se pretende encontrar el calor que se genera en cada experimento a coste de una masa desgastada.

CAPÍTULO 2

FUNDAMENTOS TEÓRICOS

2.1 TRIBOLOGÍA

La palabra tribología proviene del griego tribos, el cual se entiende como frotamiento o rozamiento por lo que la palabra tribología significa la ciencia del rozamiento, esta ciencia se encarga de estudiar la relación que existe entre la lubricación como medio para reducir el desgaste, la fricción entre dos cuerpos en movimiento y el desgaste como efecto natural de este fenómeno, es decir estudia cómo interactúan dos o más superficies que están en movimiento relativo y en contacto.

Cuando dos superficies se encuentran en contacto existe un área real de contacto y un área aparente de contacto, el área real de contacto se considera a la suma de todos los puntos en donde las dos superficies se encuentran en contacto a distancias atómicas. El área aparente solo se toma en cuenta la superficie total de los cuerpos en contacto.

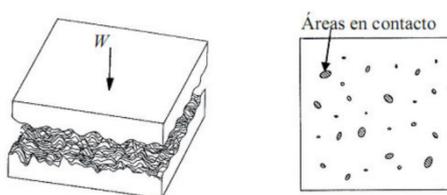


Figura 1: Área de Contacto entre Superficies de Fricción.

Fuente:[Bhushan, 2013].

De esta manera el área real de contacto se encuentra en función de la rugosidad, las condiciones de cargas aplicadas y las propiedades ínter-faciales del material como elasticidad y plasticidad.

2.1.1 FRICCIÓN

La fricción se define como la resistencia u oposición al movimiento de dos elementos que se encuentran en contacto. La fricción no es una propiedad del material, es una respuesta del sistema a una determinada acción. Esta resistencia de los cuerpos a

desplazarse depende de las características de las superficies en contacto (rugosidad) y la fuerza que presiona las superficies a permanecer juntas, esta fuerza es perpendicular o normal a las superficies y se llama fuerza normal N . La fuerza normal generalmente puede ser el peso del objeto que está sobre una superficie, pero si un objeto está en una pendiente o tiene componentes de fuerza aplicada perpendicular a la superficie, entonces es igual al peso más todas las componentes de las fuerzas perpendiculares a las superficies, de esta manera la fuerza de resistencia que actúa en dirección opuesta al movimiento se llama fuerza de fricción y puede expresarse matemáticamente como:

$$F_r = \mu N \quad (2.1)$$

dónde F_r es la Fuerza de fricción, N es la carga normal sobre la superficie de contacto y μ es el coeficiente de fricción, este puede ser: coeficiente estático (μ_s) y coeficiente cinético (μ_k , independiente de la carga normal). El coeficiente de fricción μ sin lubricación puede variar en un amplio rango, desde valores muy pequeños de 0.02 a valores tan grandes como 10 ya que depende de los materiales que estén en contacto.

2.1.1.1 MECANISMOS DE FRICCIÓN Y DESLIZAMIENTO

El mecanismo conocido como adhesión propuesto por [Bowden and Tabor, 1950] nos indica que en los puntos de contacto entre dos superficies se generan altas presiones que producen soldaduras locales que se fracturan por el movimiento relativo entre ambas superficies, estas roturas ocurren en las áreas más débiles de la interface de unión. Este fenómeno de adhesión es de la misma intensidad y naturaleza que las fuerzas que hay entre moléculas de material en volumen.

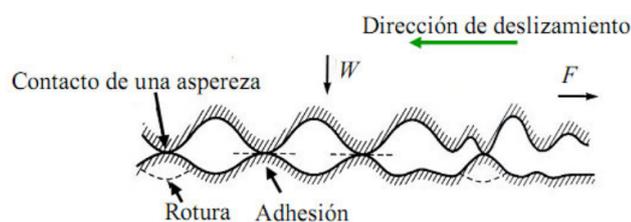


Figura 2: Adhesión Durante el Deslizamiento.

Fuente:[Bhushan, 2013].

Debido a este mecanismo de adhesión, se producen y desprenden fragmentos de los materiales en contacto llamados debris (restos de algo roto o destruido). Estos fragmentos aumentan la fricción entre las superficies en contacto, este proceso se conoce como: Fricción por impurezas abrasivas. Mediante este proceso, la fuerza de fricción varía de acuerdo a la resistencia al corte de los materiales. La fricción en deslizamiento

por deformación es otro mecanismo producido en este proceso, este fenómeno se produce en materiales dúctiles los cuales son propensos a ser deformados plásticamente por materiales más duros. La deformación producida puede provocar rotura o fragmentación, de esta manera genera un aumento en el desgaste y fricción entre los materiales porque se produciría la creación de debris.

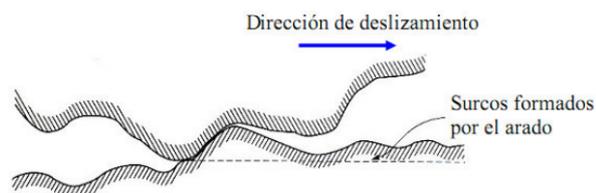


Figura 3: Deformación de las Zonas de Contacto.

Fuente:[Bhushan, 2013].

2.1.1.2 MATERIALES

Los Materiales dúctiles experimentan desgaste por deformación plástica, en los materiales frágiles, en cambio, el material es removido por la formación e intersección de grietas que se difunden desde el punto de impacto de la partícula erosionada.

2.1.1.3 APLICACIONES

Las aplicaciones se encuentran en el paro de fuerzas de torsión como ejemplo se cita los frenos de vehículos. De igual manera, se encuentran las grandes fuerzas de fricción en mecanismos de las partes de maquinaria industrial, mismos que se estudian para reducirlas. Existen investigaciones que buscan la optimización de variables o parámetros de lubricación para alargar la vida útil de las máquinas. Un proceso industrial en donde se aprovecha el calor generado por la fricción de dos materiales se llama Soldadura por Fricción, este proceso puede ser usado para unir un número diferente de materiales, la soldadura por fricción alcanza un 100 % en las uniones metal-metal establecido por [Wadson et al., 2006], donde se dan las propiedades del metal inicial en la junta.

Es el único proceso de unión en no adicionar material o material de aporte y no hay emisiones del proceso. El proceso implica realizar soldaduras en el que un componente se mueve con respecto al otro y en presión de contacto, uniendo los materiales para producir calor en las superficies de contacto. El material ablandado comienza a extrudirse en respuesta a la presión aplicada. La soldadura se completa con la aplicación de una fuerza de forja durante o después de la cesación de movimiento relativo. La junta

se somete a trabajo en caliente para formar una superficie homogénea, completa, con soldadura de alta pureza.

2.1.2 DESGASTE

El desgaste es el daño superficial o eliminación de material en una o ambas superficies de dos sólidos en movimiento relativo ya sea en deslizamiento, rotación, o el impacto entre sí. En la mayoría de los casos, el desgaste se produce a través de interacciones de superficies con asperezas. Durante el movimiento relativo, primero, el material en la superficie de contacto puede ser desplazado de modo que las propiedades del cuerpo sólido se alteran, pero poco o ningún material se pierde en realidad. Más tarde, el material puede ser retirado de una superficie y puede resultar en la transferencia a la superficie de acoplamiento o puede desprenderse como una partícula de desgaste. En el caso de transferencia de una superficie a otra, el volumen o masa pérdida neta de la interfaz es cero, aunque una de las superficies está desgastada.

La definición de desgaste se basa generalmente en la pérdida de material, pero debe hacerse hincapié en que los daños debidos al desplazamiento de material en un órgano determinado, sin cambio neto en peso o volumen, constituye también el desgaste. Como lo describe [Bhushan, 2013].

El desgaste, como la fricción, no es una propiedad del material, es una respuesta del sistema, diferentes condiciones de funcionamiento afectan al desgaste de interfaz. Erróneamente a veces se supone que las interfaces de alta fricción presentan altas tasas de desgaste.

2.1.2.1 TIPOS DE DESGASTE

- **Desgaste Adhesivo:** El desgaste adhesivo se produce cuando dos cuerpos sólidos nominalmente planos están en contacto deslizante, ya sea lubricados o no. Adhesión (o unión) se produce en los contactos de asperezas en la interfaz, y estos contactos se cortan por deslizamiento, que puede resultar en el desprendimiento de un fragmento de una superficie y el apego a la otra superficie. Como continúa el deslizamiento, los fragmentos transferidos podrían despegarse de la superficie sobre la que se transfieren y se transferirán de nuevo a la superficie original, o bien forman partículas de desgaste sueltas.
- **Desgaste Abrasivo:** El desgaste abrasivo se produce cuando asperezas de una superficie rugosa, dura o partículas duras se deslizan sobre una superficie más suave y dañan la interfaz por deformación plástica o fractura. En el caso de materiales dúctiles con alta tenacidad a la fractura (por ejemplo, metales y aleaciones), las asperezas duras o partículas duras resultan en el flujo plástico del

material más blando. La mayoría de metálicos y superficies de cerámica durante el deslizamiento muestran clara evidencia de flujo plástico, incluso algunos de los materiales frágiles de cerámica.

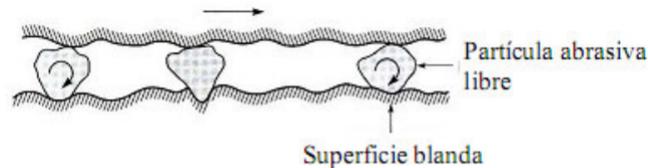


Figura 4: Movimiento de Partículas Abrasivas.

Fuente:[Bhushan, 2013].

- **Desgaste por fatiga:** La carga y descarga con ciclos repetidos a los que están expuestos los materiales pueden inducir grietas en la superficie, que finalmente, después de un número crítico de ciclos darán lugar a la ruptura de la superficie con la formación de grandes fragmentos dejando grandes hoyos en la superficie, también conocido como picaduras. Antes de este punto crítico (que puede ser cientos, miles o incluso millones de ciclos), el desgaste insignificante tiene lugar y está en marcado contraste con el desgaste causado por un adhesivo o mecanismo abrasivo, donde el desgaste provoca un deterioro gradual desde el principio del contacto. Por lo tanto, la cantidad de material eliminado por el desgaste fatiga no es un parámetro útil. Mucho más relevante es la vida útil en términos de número de revoluciones o el tiempo antes de que ocurra el fallo por fatiga.

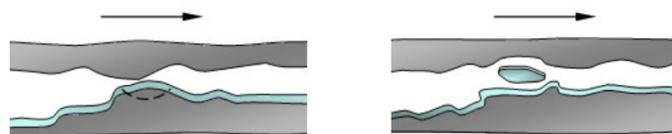


Figura 5: Ejemplificación del Desgaste por Fatiga.

Fuente:[Bhushan, 2013].

- **Desgaste por impacto:** Dos grandes tipos de fenómenos de desgaste pertenecen en esta partida: el desgaste erosivo y percusión. La erosión puede ocurrir por chorros y corrientes de partículas sólidas, gotas de líquido, y la implosión de las burbujas formadas en el fluido. La percusión ocurre desde repetitivos impactos, estos impactos repetidos dan lugar a la pérdida progresiva de material sólido.

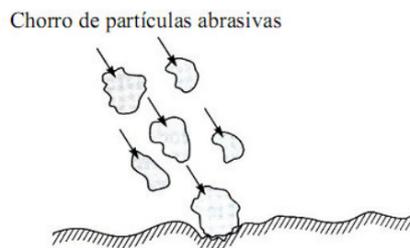


Figura 6: Chorro de Partículas Abrasivas.
Fuente:[Bhushan, 2013].

2.2 TRANSFERENCIA DE CALOR

La Transferencia de calor es la energía en movimiento debido a una diferencia de temperaturas en un cuerpo o entre cuerpos, la energía se transfiere del cuerpo de mayor temperatura al de menor temperatura. La energía que se transfiere es el calor. La transferencia de calor presenta tres mecanismos diferentes: conducción, convección y radiación.

2.2.1 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONDUCCIÓN

La conducción es un mecanismo de transferencia térmica en cual la energía se transfiere de una región de mayor temperatura a una de menor temperatura es decir existe un gradiente de temperatura, la conducción aparece en los sólidos líquidos y gases pero en estos dos últimos se combina con la convección; la conducción pura es posible fundamentalmente en los sólidos opacos. Esta energía en forma de calor se transmite debido al impacto directo o al movimiento cinético de las moléculas.

La ley de conducción de calor de Joseph Fourier establece: “La tasa de transferencia de calor por conducción en una dirección dada es proporcional al área normal a la dirección del flujo de calor y al gradiente de temperatura en esa dirección” (Incropera, 1996).

$$Q_x = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{W}) \quad (2.2)$$

$$q_x = \frac{Q_x}{A} = -k \frac{\partial T}{\partial x} \quad (\text{W/m}^2) \quad (2.3)$$

donde.

Q_x es la tasa de flujo de calor a través del área A en la dirección positiva.

k es la conductividad térmica en $\left(\frac{\text{W}}{\text{mK}}\right)$.

A es el área de la sección transversal en la transferencia de calor.

$\frac{\partial T}{\partial x}$ es el gradiente de temperatura.

2.2.1.1 CONDUCTIVIDAD TÉRMICA

Los diferentes materiales almacenan la energía calórica de diferente forma, a esta propiedad se la define como calor específico C_p la cual nos indica la capacidad de un material para almacenar energía.

La conductividad térmica k es una propiedad física de cada elemento, la cual nos indica la capacidad de un material para conducir calor, el flujo real de calor depende de esta propiedad.

Por lo tanto la conductividad térmica de un material se define como: “La velocidad de transferencia de calor a través de un espesor unitario del material por unidad de área por unidad de diferencia de temperatura” [Cengel and Hernán Pérez, 2004].

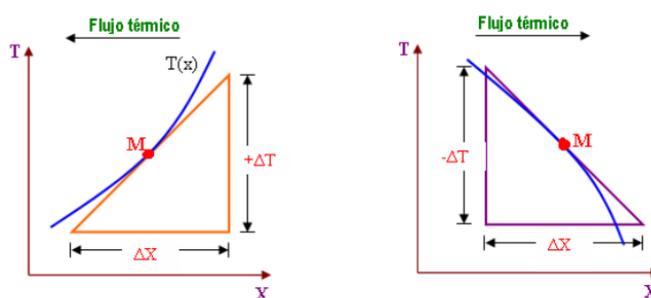


Figura 7: Signos para la Transmisión de Calor por Conducción.

Fuente:[Panana, 2009].

2.2.1.2 DIFUSIVIDAD

Se define a la capacidad calorífica de un material al producto ρC_p , donde ρ es la densidad del material, estas dos propiedades representan la capacidad para almacenar calor en un material. Pero ρC_p la expresa por unidad de volumen y C_p por unidad de masa.

La difusividad térmica es una propiedad de los materiales que nos indica cuán rápido se transfiere calor por un material, esta propiedad se utiliza para el análisis de la conducción en estado transitorio.

$$\alpha = \frac{\text{Calor Conducido}}{\text{Calor Almacenado}} = \frac{k}{\rho C_p} \quad (\text{m}^2/\text{s}) \quad (2.4)$$

2.2.1.3 CONDUCCIÓN EN ESTADO ESTACIONARIO Y TRANSITORIO

La Transferencia de Calor en estado estable significa que no existe un cambio de temperatura con el tiempo, por lo que la temperatura o flujo de calor no cambian con

el transcurso de este.

La Transferencia de Calor en estado Transitorio implica que existe una variación con el tiempo de temperatura o flujo de calor, es decir dependen del tiempo y de la posición. La transferencia de Calor es unidimensional si la temperatura cambia y el calor se transfiere en una sola dirección.

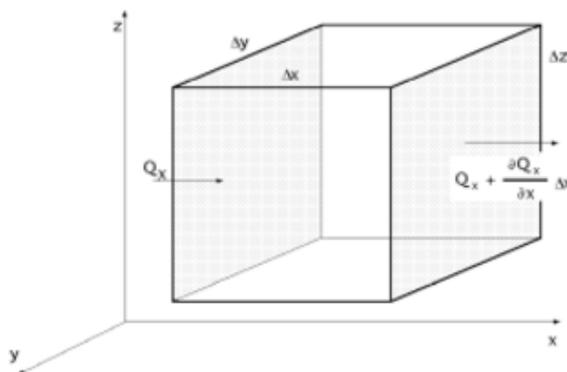


Figura 8: Paralelepípedo Elemental de Fluido.

Fuente:[Panana, 2009].

ECUACIÓN DE CONDUCCIÓN DEL CALOR El balance de energía sobre este elemento sin generación de calor durante un intervalo de tiempo Δt en un espesor delgado Δx se expresa (Figura 8) como:

$$\left(\begin{array}{c} \text{Velocidad de} \\ \text{conducción} \\ \text{del calor en } x \end{array} \right) - \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad de} \\ \text{conducción del} \\ \text{calor en } x + \Delta x \end{array} \right) = \left(\begin{array}{c} \text{Velocidad} \\ \text{de cambio del} \\ \text{contenido de} \\ \text{energía del} \\ \text{elemento} \end{array} \right)$$

es decir,

$$\dot{Q}_x - \dot{Q}_{x+\Delta x} = \frac{\Delta E_{elemento}}{\Delta t} \quad (2.5)$$

Se expresa al cambio en el contenido de energía interna como:

$$\Delta E_{elemento} = E_{t+\Delta t} - E_t = mCp(T_{t+\Delta t} - T_t) = \rho CpA\Delta x(T_{t+\Delta t} - T_t) \quad (2.6)$$

Al remplazar en la ecuación 2.5 se obtiene:

$$\dot{Q}_x - \dot{Q}_{x+\Delta x} = \frac{\rho CpA\Delta x(T_{t+\Delta t} - T_t)}{\Delta t} \quad (2.7)$$

Dividiendo toda la ecuación para $A\Delta x$ da:

$$-\frac{1}{A} \frac{\dot{Q}_{x+\Delta x} - \dot{Q}_x}{\Delta x} = \frac{\rho C p (T_{t+\Delta t} - T_t)}{\Delta t} \quad (2.8)$$

debido a la definición de derivada y reemplazando la ley de Fourier en la conducción queda la siguiente expresión:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\dot{Q}_{x+\Delta x} - \dot{Q}_x}{\Delta x} = \frac{\partial \dot{Q}}{\partial x} = \frac{\partial}{\partial x} \left(-kA \frac{\partial T}{\partial x} \right) \quad (2.9)$$

Entonces se toma el límite en la ecuación 2.9 cuando $\Delta x \rightarrow 0$ y $\Delta t \rightarrow 0$ se obtiene:

$$\frac{1}{A} \frac{\partial}{\partial x} \left(kA \frac{\partial T}{\partial x} \right) = \rho C p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.10)$$

Dividiendo para k y reemplazando la difusividad térmica $\alpha = \frac{k}{\rho C p}$ queda la Ecuación de conducción de calor sin generación de calor en estado transitorio:

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.11)$$

Siendo la ecuación de calor para estado estable ($\partial T / \partial t = 0$), sin generación de calor:

$$\frac{d^2 T}{dx^2} = 0 \quad (2.12)$$

ECUACIÓN DE CONDUCCIÓN DEL CALOR EN UN CILINDRO LARGO

Se toma la Ecuación 2.5 pero ahora x es sustituida por el radio r así:

$$\dot{Q}_r - \dot{Q}_{r+\Delta r} = \frac{\Delta E_{elemento}}{\Delta t} \quad (2.13)$$

el contenido de energía interna se expresa como:

$$\Delta E_{elemento} = E_{t+\Delta t} - E_t = m C p (T_{t+\Delta t} - T_t) = \rho C p A \Delta r (T_{t+\Delta t} - T_t) \quad (2.14)$$

Al reemplazar en la ecuación 2.14 se obtiene:

$$\dot{Q}_r - \dot{Q}_{r+\Delta r} = \frac{\rho C p A \Delta r (T_{t+\Delta t} - T_t)}{\Delta t} \quad (2.15)$$

Dividiendo toda la ecuación para $A\Delta x$, donde $A = 2\pi r L$ da:

$$-\frac{1}{A} \frac{\dot{Q}_{r+\Delta r} - \dot{Q}_r}{\Delta r} = \frac{\rho C p (T_{t+\Delta t} - T_t)}{\Delta t} \quad (2.16)$$

debido a la definición de derivada y reemplazando la ley de Fourier en la conducción queda la siguiente expresión:

$$\lim_{\Delta x \rightarrow 0} \frac{\dot{Q}_{r+\Delta r} - \dot{Q}_r}{\Delta r} = \frac{\partial \dot{Q}}{\partial r} = \frac{\partial}{\partial r} \left(-kA \frac{\partial T}{\partial r} \right) \quad (2.17)$$

Entonces se toma el límite en la ecuación 2.17 cuando $\Delta x \rightarrow 0$ y $\Delta t \rightarrow 0$ se obtiene:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(kr \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \rho C_p \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.18)$$

Dividiendo para k y reemplazando la difusividad térmica $\alpha = \frac{k}{\rho C_p}$ queda la ecuación de conducción de calor sin generación de calor en estado transitorio:

$$\frac{1}{r} \frac{\partial}{\partial r} \left(r \frac{\partial T}{\partial r} \right) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (2.19)$$

y en estado estable sin generación de calor es igual a:

$$\frac{d}{dr} \left(r \frac{dT}{dr} \right) = 0 \quad (2.20)$$

La ley de Fourier para la transferencia de calor por conducción a través de un cilindro se expresa:

$$\dot{Q}_{cond} = -kA \frac{dT}{dr} \quad (2.21)$$

dónde $A = 2\pi rL$ siendo el área de transferencia de calor para r , separando las variables de la ecuación 2.21, se integra desde $r = r_1$ hasta $r = r_2$ donde $T(r_1) = T_1$ y $T(r_2) = T_2$ y queda:

$$\int_{r_1}^{r_2} \frac{\dot{Q}_{cond}}{A} dr = - \int_{T_1}^{T_2} k dT \quad (2.22)$$

Sustituyendo el área $A = 2\pi rL$ el resultado es el siguiente:

$$\dot{Q}_{cond} = 2\pi Lk \frac{T_1 - T_2}{\ln(r_2/r_1)} \quad (\text{W}) \quad (2.23)$$

2.2.2 TRANSFERENCIA DE CALOR POR CONVECCIÓN

La convección es el mecanismo de transferencia de calor que se produce cuando un fluido con una temperatura T_a se pone en contacto con la superficie de un elemento sólido con temperatura distinta T_s .

La ley de Enfriamiento de Newton tomada de [Barragán, 2009] nos dice que, “La rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de

temperatura” y se expresa como:

$$\dot{Q}_{conv} = h_c A_s (T_s - T_a) \quad (\text{W}), \quad (2.24)$$

donde.

h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección en $\text{W}/\text{m}^2\text{°C}$.

A_s es el área superficial por el cual la transferencia de calor ocurre.

T_s es la temperatura superficial del material.

T_a es la temperatura del ambiente.

2.2.2.1 CONVECCIÓN NATURAL

La convección natural se produce cuando el movimiento del fluido es producido por las fuerzas de empuje inducidas por un diferencial de densidad debido a los cambios de temperatura en ese fluido [Cengel and Hernán Pérez, 2004].

2.2.2.2 CONVECCIÓN FORZADA

Se produce cuando una fuerza exterior mueve el fluido de convección con una velocidad v sobre la superficie del elemento que se encuentra a una temperatura superficial T_s , de esta manera se transfiere una mayor cantidad de calor que en la convección natural.

2.2.2.3 COEFICIENTE DE TRANSFERENCIA DE CALOR

El coeficiente de transferencia de calor por convección forzada por lo general depende de la densidad, velocidad, viscosidad, del fluido donde la convección se lleva a cabo, al igual que sus propiedades de conducción y calor específico a la temperatura de película.

- Convección forzada flujo externo

Ecuación de Wattmuff, tomada de [Kumar and Mullick, 2010].

$$h_{c,b-a} = 2,8 + 3v_{aire} \quad (\text{W}/\text{m}^2\text{°C}) \quad (2.25)$$

La Ecuación de Wattmuff permite calcular el coeficiente de convección para un elemento estático sometido al enfriamiento que produce la velocidad del aire. El coeficiente de transferencia de calor por convección inducida por el viento se calcula numéricamente. [Ladas, 2014]

2.2.2.4 ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA EJES ROTATORIOS

Para determinar el calor perdido por convección en la probeta de acero es necesario determinar el coeficiente de convección utilizando la teoría de ejes rotatorios, para lo cual la expresión para determinar el coeficiente de convección es la siguiente:

$$\frac{h_{c,ac-a} \cdot D_o}{k} = 0,11 (0,5Re_{\omega}^2 + Gr_D Pr)^{0,35}, \quad (2.26)$$

donde.

$h_{c,ac-a}$ es el coeficiente de convección para ejes rotatorios.

D_o es el diámetro externo del eje.

k es el conductividad térmica del material.

Pr es el número de Prandtl.

Re_{ω} es el número de Reynolds.

Gr_D es el número de Grashoff característico para la convección natural.

$$Gr_D = \frac{\rho^2 \beta g (T_s - T_a) D^3}{\mu^2}, \quad (2.27)$$

donde.

ρ es la densidad del fluido (kg/m^3).

μ es la viscosidad dinámica del fluido ($\text{kg/m}\cdot\text{s}$).

D es el diámetro del cilindro (m).

g es la gravedad de la tierra (9.8 m/s^2).

β es el coeficiente de expansión volumétrica.

T_s es la temperatura superficial ($^{\circ}\text{K}$).

T_a es la temperatura del ambiente ($^{\circ}\text{K}$).

El coeficiente de expansión volumétrica se calcula de la siguiente forma:

$$\beta = \frac{1}{T_p},$$

donde.

$$T_p = \frac{T_s + T_a}{2}$$

y el número adimensional característico de la convección forzada es el número de Reynolds Re_ω y se calcula de la siguiente manera:

$$Re_\omega = \frac{\rho\pi D^2\omega}{\mu}, \quad (2.28)$$

donde.

ρ es la densidad del fluido (kg/m^3).

μ es la viscosidad dinámica del fluido ($\text{kg}/\text{m}\cdot\text{s}$).

D es el diámetro del cilindro (m).

ω es la velocidad angular (rad/s)

2.2.3 TRANSFERENCIA DE CALOR POR RADIACIÓN

La radiación térmica a diferencia de la conducción y la convección puede transportar la energía en forma de calor a través de un fluido o al vacío, en forma de fotones u ondas electromagnéticas. La cantidad de calor radiante que pierde una región superficial depende de la temperatura a la que se encuentra la región y la temperatura ambiente.

Un cuerpo negro conocido como radiador perfecto emite energía radiante de su superficie Q_r igual a:

$$Q_r = \sigma A_s T^4 = A E_b, \quad (2.29)$$

donde.

E_b es el poder emisivo del cuerpo negro.

σ es la constante dimensional de Stefan-Boltzmann igual a $5,67 \times 10^8 \text{ W}/\text{m}^2\text{K}^4$.

A_s es el área superficial del cuerpo por donde se emite radiación.

Cuando un cuerpo negro irradia energía calórica a un ambiente que lo rodea completamente y la superficie de este recinto también es negra, la transferencia de calor radiante viene dada por la siguiente expresión:

$$Q_r = \sigma A_s (T_c^4 - T_\infty^4), \quad (2.30)$$

donde.

T_c es la temperatura del cuerpo gris.

T_∞ es la temperatura del recinto.

Un cuerpo gris emite radiación de acuerdo a la siguiente expresión:

$$Q_r = \varepsilon A_s T^4 \quad (2.31)$$

Por lo tanto el calor radiante transferido por un cuerpo gris a la temperatura T_1 a un cuerpo negro que lo rodea a la temperatura T_2 es:

$$Q_r = \varepsilon \sigma A_s (T_1^4 - T_2^4), \quad (2.32)$$

donde.

ε la emisividad del material, la emisividad es una propiedad superficial la cual nos indica la proporción de emisividad que existe entre el cuerpo en análisis con respecto a la emisividad de un cuerpo negro, ε indica que tan efectivo un cuerpo emite radiación.

Tabla 1

Valores de Emisividad de Materiales Comunes.

Materiales	Emisividad
Acero Inoxidable Pulido	0.16
Acero Inoxidable Oxidado a 800°C	0.85
Acero Galvanizado	0.28
Acero Pulido	0.07
Acero Oxidado	0.79
Acero Rugoso	0.90
Aluminio Pulido	0.05
Aluminio Oxidado	0.19
Aluminio muy Degradado	0.83-0.94
Bronce Pulido	0.10
Bronce Rugoso-Maquinado	0.55
Cobre Pulido	0.05
Cobre Oxidado	0.65
Cromo Pulido	0.10
Hierro Fundido Pulido	0.21
Hierro Fundido Oxidado	0.64
Latón Pulido	0.10
Latón Oxidado	0.61

Fuente: [Testo, 2001].

2.2.3.1 COEFICIENTE DE RADIACIÓN:

La temperatura media de superficie se calcula como la temperatura media del elemento y del ambiente así:

$$T_m = \frac{T_b + T_a}{2},$$

donde.

T_b es la temperatura superficial del elemento.

T_a es la temperatura del ambiente.

El coeficiente de radiación se calcula con la siguiente formula:

$$h_r = 4\varepsilon\sigma T_m^3 \quad (2.33)$$

- Calor perdido por radiación es igual a:

$$q_{pr} = h_r A_o (T_b - T_a), \quad (2.34)$$

donde.

h_r es el coeficiente de radiación.

A_o es el área superficial del elemento.

T_b es la temperatura superficial del elemento.

T_a es la temperatura del ambiente.

2.3 CALOR PRODUCIDO POR FRICCIÓN

2.3.1 CALOR DE FRICCIÓN

La generación de Calor por Fricción Q_g para el estado estable de dos superficies en contacto se determina con la siguiente expresión resolviendo el siguiente balance térmico:

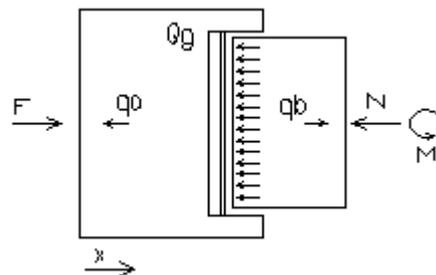


Figura 9: Modelo de Generación de Calor por Fricción.

$$Q_g = q_a + q_b, \quad (2.35)$$

donde.

q_a es el calor útil conducido hacia la izquierda.

q_b es el calor transferido al elemento en rotación.

F es la fuerza de aplastamiento.

N es la fuerza normal.

M es el momento de la Fuerza de rozamiento.

Para los dos casos de conducción se aplica la Ley de Fourier, donde la ecuación diferencial para analizar la transferencia de calor es:

$$\frac{d^2T}{dx^2} = \frac{HC}{kA} (T_p - T_a), \quad (2.36)$$

donde.

T_p es la temperatura de pared.

T_a es la temperatura ambiente.

k es la conductividad térmica del material.

A es el área de la superficie de transferencia de calor.

C es el perímetro del eje.

H es la suma de los coeficientes de transferencia de calor.

h_r coeficiente de transferencia de calor por radiación.

h_c es el coeficiente de transferencia de calor por convección.

El perfil de Temperatura de este fenómeno termo-mecánico es la siguiente:

$$\theta = \theta_0 \tanh(mL) \quad (2.37)$$

Debido a que se considera como una aleta. La curvatura del perfil de temperatura depende de las propiedades de los elementos en contacto y una de estas propiedades es la conductividad térmica k .

El calor transferido en $x = 0$ es igual a:

$$q_0 = kAm\theta_0 \tanh(mL) \quad (2.38)$$

En que $\theta_0 = T_p - T_a$, y el valor de m se calcula, $m = \sqrt{\frac{HC}{kA}}$

De manera análoga se puede calcular el calor producido por la fricción en elementos circulares mediante la siguiente expresión:

Ecuación del Calor de Fricción

$$q_{Gf} = \frac{2}{3} \omega P^o \pi [R_o^3 - R_i^3], \quad (2.39)$$

donde.

ω es la velocidad angular.

P^o es la presión de aplastamiento.

R_o es el radio externo del cilindro.

R_i es el radio interno del cilindro.

2.3.2 TEMPERATURA DE CONTACTO

2.3.2.1 CONTACTO ENTRE DOS SÓLIDOS SEMI INFINITOS

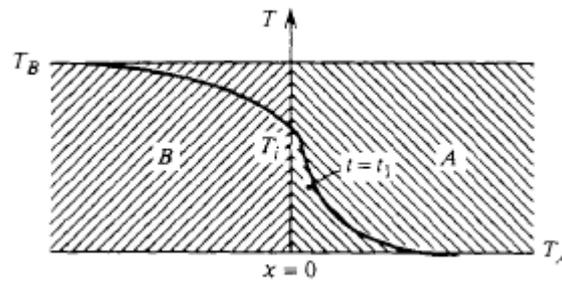


Figura 10: Contacto entre Dos Sólidos Semi infinitos.

Fuente: [Mills and de Régules Ruiz-Funes, 1995].

Se realiza un estudio previo con dos sólidos semi infinitos A y B, de materiales distintos con temperaturas T_a y T_b , que se ponen en contacto en el instante $t = 0$, como se muestra en la Figura 10, la solución de este problema demuestra que la temperatura de interfaz T_i es constante en el tiempo y está dada por [Mills and de Régules Ruiz-Funes, 1995].

$$\frac{T_A - T_i}{T_i - T_B} = \frac{k_B}{k_A} \left(\frac{\alpha_A}{\alpha_B} \right)^{1/2} = \left(\frac{(k\rho c)_B}{(k\rho c)_A} \right)^{1/2} \quad (2.40)$$

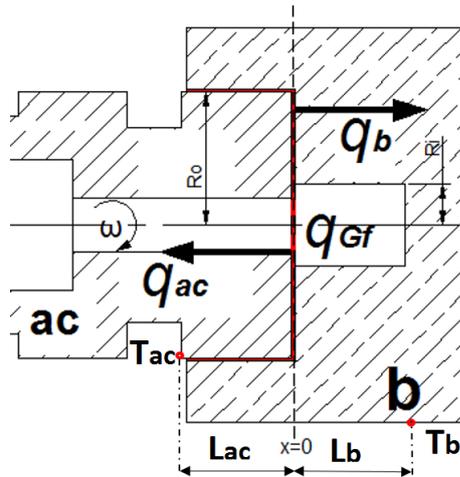


Figura 11: Contacto entre superficies de fricción

donde L_{ac} y L_b son distancias a las cuales las temperaturas T_{ac} y T_b se encuentran con respecto a T_i . Para el caso particular en el cual la generación de calor se produce por fricción en la parte de contacto $x = 0$ la expresión que nos permite calcular T_i se deduce del siguiente balance:

$$q_{Gf} = q_{ac} + q_b \quad (2.41)$$

$$\frac{2}{3} \omega P^o \pi [R_o^3 - R_i^3] = A_f k_a \frac{(T_i - T_{ac})}{L_{ac}} + A_f k_b \frac{(T_i - T_b)}{L_b}, \quad (2.42)$$

donde.

A_f es el área de fricción igual $\pi (R_o^2 - R_i^2)$.

P^o es la presión de aplastamiento igual a $\frac{F_a}{A_f}$.

Por lo que la expresión nos queda:

$$\begin{aligned} q_{Gf} &= q_{ac} + q_b \\ \frac{2}{3} \omega P^o \pi [R_o^3 - R_i^3] &= A_f \frac{k_{ac}(T_c - T_{ac})}{x_{ac}} + A_f \frac{k_b(T_c - T_b)}{x_b} \\ \frac{2}{3} \omega \frac{F_a}{A_f} \pi [R_o^3 - R_i^3] &= A_f \left[\frac{k_{ac}(T_c - T_{ac})}{x_{ac}} + \frac{k_b(T_c - T_b)}{x_b} \right] \\ \frac{2}{3} \omega F_a \pi [R_o^3 - R_i^3] &= A_f^2 \left[\frac{k_{ac}(T_c - T_{ac})}{x_{ac}} + \frac{k_b(T_c - T_b)}{x_b} \right] \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
\frac{2}{3}\omega F_a [R_o^3 - R_i^3] &= \pi (R_o^2 - R_i^2)^2 \left[\frac{k_{ac}(T_c - T_{ac})}{x_{ac}} + \frac{k_b(T_c - T_b)}{x_b} \right] \\
\frac{2}{3}\omega F_a [R_o^3 - R_i^3] &= \frac{k_{ac}T_c x_b - k_{ac}T_{ac} x_b + k_b T_c x_{ac} - k_b T_b x_{ac}}{x_{ac} x_b} \\
\frac{2}{3}\omega F_a [R_o^3 - R_i^3] &= \frac{T_c (k_{ac} x_b + k_b x_{ac}) - k_{ac} T_{ac} x_b - k_b T_b x_{ac}}{x_{ac} x_b}
\end{aligned}$$

De la expresión anterior se despeja la temperatura de contacto T_i y nos queda:

$$T_i = \frac{\frac{2}{3} \frac{\omega \pi F [R_o^3 - R_i^3]}{(R_o^2 - R_i^2)^2} + k_a T_a L_b + k_b T_b L_a}{k_a L_b + k_b L_a} \quad (2.43)$$

2.4 ESFUERZOS MECÁNICOS PRODUCIDOS POR FRICCIÓN

Cuando existen fuerzas y momentos totales sobre una superficie en particular y estos están distribuidos en toda el área. Dicha distribución actúa sobre un punto y tendrá componentes en direcciones normal y tangencial llamadas esfuerzo normal y esfuerzo cortante tangencial, respectivamente. Si el esfuerzo normal es saliente a una superficie se nombra esfuerzo a tensión, del mismo modo si este está entrante a la superficie se le llama esfuerzo a compresión.

La suposición de un esfuerzo uniforme significa que si se corta el elemento que puede ser una barra en una sección alejada de los extremos y se remueve una parte se puede reemplazar su efecto aplicando una fuerza uniformemente distribuida de magnitud σA al extremo cortado, por tanto el esfuerzo σ uniformemente distribuido se calcula mediante la ecuación. Tomada de [Budynas et al., 2008].

$$\sigma = \frac{F}{A} \quad (2.44)$$

La distribución uniforme del esfuerzo requiere que:

- El elemento sea recto y de un material homogéneo.
- La línea de acción de la fuerza pase por el centroide de la sección del elemento.
- La sección debe estar alejada de cualquier discontinuidad o cambio abrupto de sección.

La Ecuación 2.44 es válida para compresión simple, donde normalmente F se considera negativa.

Cuando existen fuerzas cortantes sin flexión se produce un esfuerzo cortante directo [Budynas et al., 2008], así se puede considerar una viga en voladizo con una fuerza que empuja hacia abajo en paralelo a una pared donde se encuentra el voladizo, de esta forma no habrá flexión y el cortante será directo se supone que es uniforme a través de toda la sección. El esfuerzo cortante está dado por:

$$\tau = \frac{V}{A}, \quad (2.45)$$

donde.

V es la fuerza cortante.

A es el área de la sección transversal que está siendo cortada.

Un elemento barra está sometido a torsión cuando un vector momento está colineal con el eje del elemento mecánico llamándose vector de par de torsión causando que el elemento se tuerza respecto a su eje [Budynas et al., 2008].

El ángulo de giro, en radianes, de una barra sólida de sección circular se calcula mediante:

$$\theta = \frac{Tl}{GJ}, \quad (2.46)$$

donde.

T es el par de torsión.

l es la longitud.

G es el módulo de rigidez.

J es el segundo momento polar del área.

En una barra redonda de torsión los esfuerzos cortantes son proporcionales al radio ρ y están dados por:

$$\tau = \frac{T\rho}{J} \quad (2.47)$$

Para esto se debe cumplir que:

- El par de torsión sobre la barra debe ser puro.
- El material obedece a la Ley de Hooke.
- Las secciones transversales adyacentes deben ser planas y paralelas.

El segundo momento polar del área para sección circular sólida es:

$$J = \frac{\pi d^4}{32}, \quad (2.48)$$

donde.

d es el diámetro de la barra.

El segundo momento polar del área para sección transversal redonda hueca es:

$$J = \frac{\pi}{32}(d_o^4 - d_i^4) \quad (2.49)$$

Los subíndices son los diámetros exterior e interior respectivamente.

2.4.1 COMBINACIÓN DE ESFUERZOS

En este estudio una probeta estará sometida a la combinación de dos esfuerzos, por tanto se puede aplicar la teoría de energía de distorsión para materiales dúctiles, la cual predice que la falla por fluencia ocurre cuando la energía de deformación total por unidad de volumen alcanza o excede la energía de deformación por unidad de volumen correspondiente a la resistencia a la fluencia en tensión o en compresión del mismo material. La fluencia de un material no es un fenómeno de tensión o compresión simples si no que está relacionado con la distorsión angular del elemento esforzado [Budynas et al., 2008].

Von Mises establece un procedimiento para combinar los esfuerzos principales en un estado particular dando como resultado una ecuación que sirve de manera eficaz esta combinación siempre y cuando los materiales involucrados sean dúctiles. La fórmula es:

$$\sigma = \sqrt{\sigma_p^2 + 3\tau^2}, \quad (2.50)$$

donde.

σ_p es el esfuerzo a tensión o compresión particular a combinarse.

τ es el esfuerzo de torsión.

Las máquinas rotatorias adoptan características con patrones sinusoidales. Existen otras que adoptan características con patrones distintos. Sin embargo, estos patrones no son de relevante importancia ya que si se conoce el esfuerzo máximo y el esfuerzo mínimo se puede construir una componente alterante y otra uniforme, de la siguiente manera:

$$\sigma_a = \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \quad (2.51)$$

$$\sigma_m = \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2}, \quad (2.52)$$

donde.

σ_{max} es el esfuerzo máximo de un estado en particular.

σ_{min} es la componente menor de la amplitud de dicho estado.

Un esfuerzo constante o estático no es el mismo que el esfuerzo medio. Este puede adoptar cualquier valor [Budynas et al., 2008].

2.4.2 FACTORES QUE MODIFICAN LA RESISTENCIA A LA FATIGA.

El límite de resistencia a la fatiga proviene de muchos datos de muchas fuentes. Estos datos guardan una correlación la cual se expresa mediante una fórmula tomada de [Budynas et al., 2008].

$$S_{e_{nm}} = \begin{cases} 0.5S_{ut} & S_{ut} \leq 200 \text{ [ksi]} (140 \text{ [MPa]}) \\ 130 \text{ [ksi]} & S_{ut} \geq 200 \text{ [ksi]} \\ 700 \text{ [MPa]} & S_{ut} \geq 1400 \text{ [ksi]} \end{cases}, \quad (2.53)$$

donde.

S_{ut} es la resistencia a la rotura del material.

La resistencia a la fatiga no modificada 2.53 es un valor de resistencia ideal el cual debe ser modificado con ciertos factores que son los siguientes:

k_a es el factor de modificación por la condición superficial.

k_b es el factor de modificación por carga.

k_c es el factor de modificación por la condición superficial.

k_d es el factor de modificación por temperatura.

k_e es el factor de modificación por confiabilidad.

k_f es el factor de modificación por efectos varios.

En la sección de diseño de la probeta de acero se abordará cada fórmula con sus respectivas gráficas para el cálculo de los mismos. Con estos factores se determina la resistencia a la fatiga modificada de la siguiente manera:

$$S_e = S_{e_{nm}} k_a k_b k_c k_d k_e, \quad (2.54)$$

donde.

S_e es la resistencia a la fatiga modificada.

En la Figura 12 se puede visualizar las rectas con criterios de fallas, en este estudio se utiliza la recta de Soderberg ya que esta provee protección a la fluencia. La fórmula es:

$$\frac{\sigma_a}{S_e} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{F_s}, \quad (2.55)$$

donde.

F_s es el factor de seguridad del elemento o pieza diseñado.

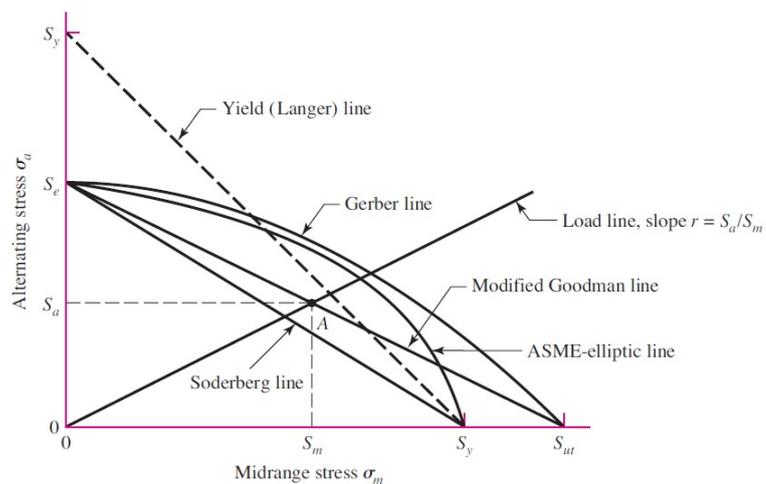


Figura 12: Rectas con Criterios de Fallas.

Fuente:[Budynas et al., 2008].

2.4.3 ESFUERZOS PRODUCIDOS POR PRESIÓN INTERNA

Los esfuerzos producidos son esfuerzos radiales y tangenciales. Cuando la presión es externa [Budynas et al., 2008] Capítulo 3, Ecuación 3-50 propone las fórmulas para su cálculo:

$$\begin{aligned}\sigma_t &= \frac{r_i^2 p_i}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r_i^2}\right) \\ \sigma_r &= \frac{r_i^2 p_i}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r_i^2}\right),\end{aligned}$$

donde.

σ_t es el esfuerzo tangencial.

σ_r es el esfuerzo radial.

r_i y r_o son los diámetros exterior e interior respectivamente.

p_i es la presión interna.

2.5 DILATACIÓN TÉRMICA

Cuando en un elemento o pieza se incrementa la temperatura este dilatará dicho elemento siempre y cuando no tenga restricciones. Su deformación unitaria normal es:

$$\epsilon_x = \epsilon_x = \epsilon_x = \alpha(\Delta T), \quad (2.56)$$

donde.

ϵ_x es la deformación en la dirección x , analógicamente en las dos direcciones restantes.

α es el coeficiente de dilatación térmica.

ΔT es la variación de temperatura.

La Ecuación 2.56 fue tomada de [Budynas et al., 2008] Capítulo 3.

2.5.1 ESFUERZOS TÉRMICOS

Si el elemento tiene restringidos los extremos para prevenir la dilatación longitudinal y la temperatura se somete a un incremento uniforme, se desarrolla un esfuerzo de compresión debido a la restricción [Budynas et al., 2008] dado por la ecuación:

$$\sigma = -\epsilon E = -\alpha(\Delta T)E$$

De manera similar si se restringen los extremos en todas las direcciones el esfuerzo producido por compresión será:

$$\sigma = -\frac{3\alpha(\Delta T)E}{1-\nu},$$

donde.

ν es la relación de Poisson del material dilatado.

2.5.2 LEY DE DUHAMEL NEUMANN

En los sólidos en donde exista en su interior un gradiente de temperatura, existirán variaciones en su estado tensión-deformación, ya que los materiales tienden a expandirse al aumentar la temperatura por dilatación térmica, en donde las fuerzas producidas por este fenómeno son un término agregado en el balance energético general.

$$k\Delta^2\theta = 2G\frac{1+\nu}{1-2\nu}\alpha T_0\dot{\epsilon}_{kk} + \rho c\dot{\theta} - \rho R, \quad (2.57)$$

donde.

Δ es la variación de temperatura.

k es la conductividad térmica.

G es el módulo de elasticidad transversal.

ν es el módulo de Poisson.

α es el coeficiente de dilatación térmica.

T_0 es la temperatura de referencia.

$\dot{\epsilon}_{kk}$ es la tasa de deformación.

ρ es la densidad.

c es el calor específico del material.

$\dot{\theta}$ es el flujo de calor.

R es el calor generado (representa la entropía).

La ley Duhamel Neumann incluye los efectos de las cargas térmicas y mecánicas, esta ley esta basada en la premisa de la deformación total en un punto del solido que esta sujeto a cargas termo-mecánicas, consistente en la deformación mecánica ϵ_{ij}^m y la deformación causada por la libre expansión térmica ϵ_{ij}^t .

$$\epsilon_{ij} = \epsilon_{ij}^m + \epsilon_{ij}^t \quad (2.58)$$

$$\varepsilon_{ij} = \frac{1}{E} [(1 - \nu) \sigma_{ij} - \nu \sigma_{kk} \delta_{ij}] + \alpha \Delta T \delta_{ij} \quad (2.59)$$

$$\varepsilon_x = \frac{1}{E} [\sigma_x - \nu (\sigma_y + \sigma_z)] + \alpha \Delta T \quad (2.60)$$

Suponiendo que no existen fuerzas externas y no se impida su dilatación el tensor de deformación es:

$$\varepsilon_x = \alpha \Delta T$$

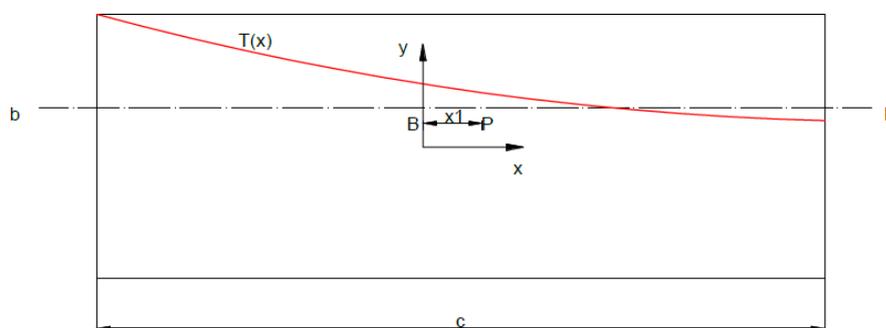


Figura 13: Distribución no Lineal no Simétrica de Temperaturas.

Para un caso de una distribución no lineal no simétrica de temperaturas aparecerá una fuerza resultante y un momento en el punto B generada por la expansión térmica en una sección paralela al flujo de calor es igual a: (Tomado de [Narváez, 2011]).

$$Fr = - \int_0^c E \alpha \Delta T(x) dx$$

Si se aplica una restricción por el otro lado de la sección b-b, se generara una fuerza igual pero de signo contrario el esfuerzo resultante es el siguiente:

$$\sigma_d = -E \alpha \Delta T(x) + \frac{1}{2c} \int_0^c E \alpha \Delta T(x) dx + \frac{3x}{2c^2} \int_0^c E \alpha \Delta T(x) x dx$$

Para determinar $T(x)$ se plantea las siguientes condiciones de frontera para resolver la Ecuación de conducción de calor.

$$\begin{cases} T(x_1) = T_f \\ \frac{dT(0)}{dx} = 0 \end{cases}$$

$$\frac{d^2 T(x)}{dx^2} = -\frac{\dot{q}}{k}$$

Se integra la expresión:

$$\frac{dT}{dx} = -\frac{\dot{q}}{k}x + C_1$$

Se aplica las condiciones de frontera:

$$\begin{aligned} 0 &= -\frac{\dot{q}}{k}0 + C_1 \\ C_1 &= 0 \end{aligned}$$

Se Integra por segunda vez:

$$T(x) = -\frac{\dot{q}}{2k}x^2 + C_2$$

donde: $T(x_1) = T_f$

$$\begin{aligned} T_f &= -\frac{\dot{q}}{2k}x_1^2 + C_2 \\ C_2 &= T_f + \frac{\dot{q}}{2k}x_1^2 \end{aligned}$$

La Ecuación de conducción del calor es:

$$T(x) = T_f + \frac{\dot{q}}{2k}(x_1^2 - x^2) \quad (2.61)$$

donde el esfuerzo térmico generado por la variación de temperatura $\Delta T(x) = T(x) - T_a$, con una generación de calor uniforme es:

$$\begin{aligned} \sigma_d &= -E\alpha\Delta T(x) + \frac{1}{2c} \int_0^c E\alpha(T(x) - T_a) dx + \frac{3x}{2c^2} \int_0^c E\alpha(T(x) - T_a)\Delta T(x) x dx \\ \sigma_d &= -E\alpha\Delta T(x) + \frac{1}{2c} \int_0^c E\alpha \left(T_f + \frac{\dot{q}}{2k}(x_1^2 - x^2) - T_a \right) dx \\ &\quad + \frac{3x}{2c^2} \int_0^c E\alpha \left(T_f + \frac{\dot{q}}{2k}(x_1^2 - x^2) - T_a \right) \Delta T(x) x dx \end{aligned} \quad (2.62)$$

2.6 TRATAMIENTO TÉRMICO.

Un tratamiento térmico es un proceso de calentamiento y enfriamiento controlado que tiene como objetivo mejorar las propiedades mecánicas de los metales y aleaciones modificando la naturaleza de los constituyentes sin alterar la composición química.

Mediante un tratamiento térmico se puede conferir propiedades particulares a las capas superficiales de los materiales, se puede provocar modificaciones de tipo estructural, de forma y de dimensión de los micro constituyentes sin modificar su naturaleza y se puede modificar la intensidad y distribución de las tensiones internas.

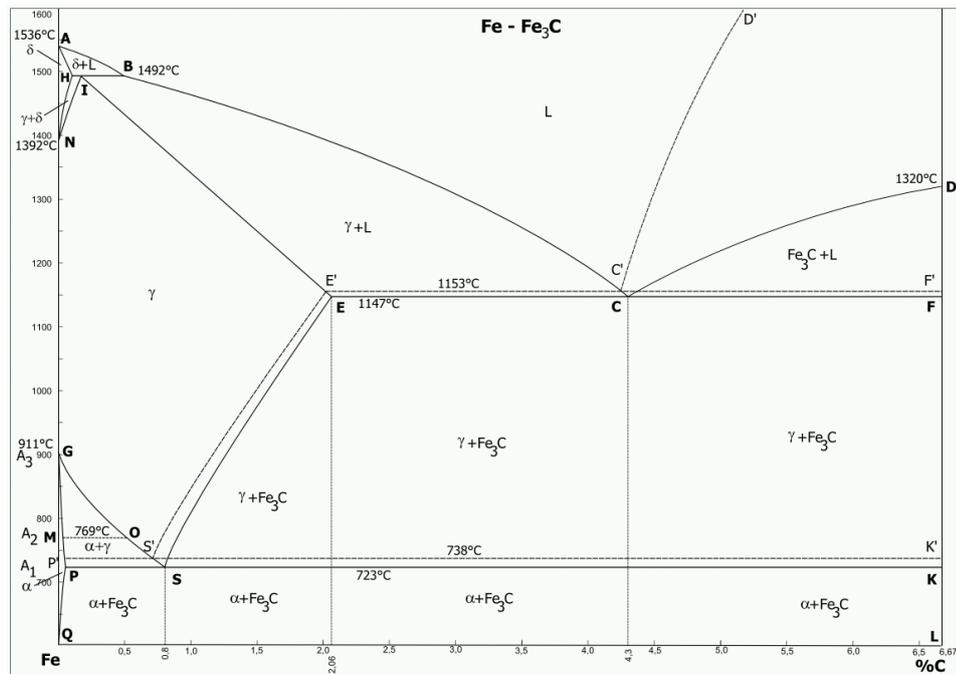


Figura 14: Diagrama de Fase Hierro-Carbono.

Fuente: [Eisen-Kohlenstoff, 2005].

2.6.1 MICRO CONSTITUYENTES.

A medida que se aumenta la temperatura desde la base ambiente el hierro puro presenta 3 estados o fases alotrópicas.

A una temperatura de 911 °C A3 el hierro recibe la denominación de ferrita o hierro α (alfa) presentado propiedades de ductilidad y maleabilidad proporcionado forjabilidad en aleaciones con bajo contenido de carbono, siendo ferromagnético hasta A2 de 769 °C.

En valores de temperatura de 911 y 1400 °C el hierro recibe la denominación de austenita o hierro γ (gamma), la austenita es paramagnética y se deforma con una mayor facilidad.

Para valores conformados entre 1400 y 1538 °C el hierro recibe la denominación de hierro δ .

Los aceros aleados al carbono están constituidos por ferrita y un compuesto denominado carburo de hierro (Fe_3C) o cementita.

2.6.1.1 TRANSFORMACIONES DE AUSTENITA.

En el diagrama de fase Fe-C se muestran dos composiciones:

Un eutéctico contiene un 4,3 % de carbono (64,5 % de cementita) denominado ledeburita, en este estado se observa que por encima de la temperatura A1, los aceros están formados por austenita y una solución sólida de carbono en hierro γ .

Un eutectoide contiene un 0,80 %C (13,5 % de cementita) denominado perlita. Está formado por capas de ferrita y cementita, teniendo propiedades mecánicas intermedias de la ferrita y la cementita.

Existen dos tipos de aleaciones de acero en el estado eutectoide: Aceros hipoeutectoides (menor a 0,80 % C). La ferrita al enfriarse por debajo de la temperatura A3 comienza a precipitarse entre los granos de austenita y cuando alcanza la temperatura crítica A1 la austenita sobrante se convierte en perlita. Aceros hipereutectoides (mayor a 0,80 % C). El carburo de hierro al enfriarse por debajo de la temperatura crítica se precipita resultando a temperatura ambiente cristales de perlita en una matriz de cementita.

Otros microconstituyentes

Las estructuras básicas descritas anteriormente se las obtiene enfriando lentamente aceros al carbono, sin embargo cuando se modifica las condiciones de enfriamiento a base de los tratamientos térmicos se puede obtener diferentes estructuras cristalinas como la martensita que es el microconstituyente típico de los aceros templados y se lo obtiene al enfriar rápidamente la austenita. Siendo la martensita una solución de carbono en hierro alfa, es uno de los constituyentes más duros de los aceros después de la cementita.

Cuando existen velocidades intermedias de enfriamiento se produce la bainita, que es una estructura parecida a la perlita con agujas de ferrita y cementita pero de mayor ductilidad y resistencia.

2.6.2 TRATAMIENTOS ISOTERMOS: CURVAS TTT.

Son transformaciones de fase que ocurren en un acero con una determinada composición química cuando se lo enfría manteniendo a una temperatura constante durante un tiempo, estas transformaciones de fase isotérmicas son específicas para cada acero y sus elementos aleantes.

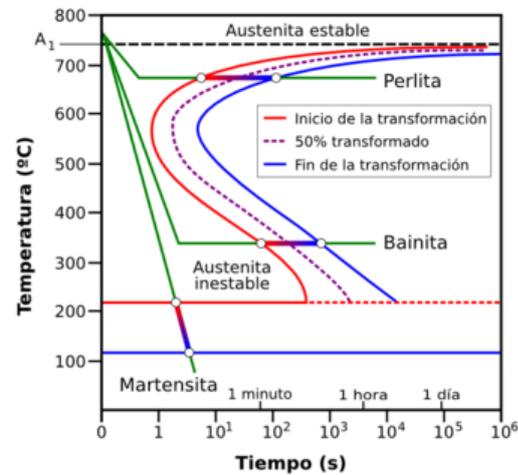


Figura 15: Diagrama Temperatura Tiempo Transformación.

Fuente: [Rodríguez, 2014].

2.6.2.1 TEMPLE

El temple se lo utiliza para tener un tipo de estructura cristalina en el acero con alta dureza llamado martensita, que se lo obtiene elevando al temperatura cercana a A₃ de la Figura 14 para luego enfriar el acero de manera rápida y continua en agua, aceite o aire, de esta manera se aumenta la dureza del acero, pero el acero resultante será poco dúctil y frágil ya que existen elevadas tensiones internas. La templabilidad es la capacidad que tiene un acero para transformar la austenita en martensita durante el proceso de temple dependiendo de su composición química.

2.6.2.2 REVENIDO

El proceso de revenido consiste en elevar la temperatura de la pieza hasta una cierta temperatura específica por el fabricante del acero, de esta manera se reducen las tensiones internas producidas por el temple, disminuyendo un poco la dureza pero se evita que el acero se fragilice.

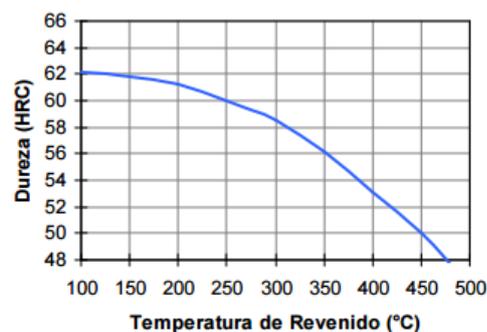


Figura 16: Temperatura de Revenido.

2.6.2.3 RECOCIDO

El recocido consisten en elevar la temperatura de un material a una temperatura específica manteniendo la temperatura durante un tiempo para luego enfriarlo hasta la temperatura ambiente controlando la velocidad de enfriamiento, de esta manera se eliminan las tensiones internas de otros tratamientos térmicos como el temple. El nivel de plasticidad que quiere tener en el acero depende de la temperatura inicial.

2.6.2.4 NORMALIZADO

Es un tratamiento térmico que se lo utiliza para eliminar las tensiones internas del material después de una conformación mecánica como la laminación o forja de esta manera proporciona al acero propiedades normales a su composición.

El normalizado se lo realiza calentando el acero hasta una temperatura crítica A1 y se mantiene esa temperatura durante un tiempo de esta manera su microestructura se vuelve más uniforme aumentando su tenacidad.

2.6.3 TRATAMIENTO CON ENFRIAMIENTO CONTÍNUO: CURVAS CCT

Las Curvas denominadas CCT (Continuous Cooling Transformation) describen las transformaciones que ocurren durante enfriamientos continuos. La representación gráfica de las transformaciones en condiciones de enfriamiento continuo, se realiza en un diagrama temperatura contra el logaritmo del tiempo. Ver Figura 17.

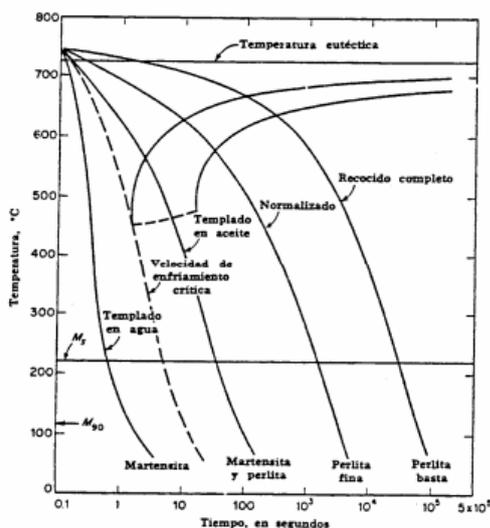


Figura 17: Curva de Enfriamiento Continuo.

Fuente: [Nacional,].

2.7 DISEÑO DE EXPERIMENTOS DE TAGUCHI

Es una metodología ideada por el matemático japonés G. Taguchi para obtener la optimización de productos y procesos, a fin de asegurar productos robustos, de alta calidad y bajo costo. Este método es ampliamente utilizado en estudios industriales y científicos, ya que no requiere cálculos matemáticos complejos y pueden determinar fácilmente los niveles óptimos de los parámetros del proceso. Tiene tres partes principales que son diseño del sistema, diseño de parámetros y diseño de tolerancias.

El diseño de parámetros es el más importante ya que son los que afectan la característica de calidad de tal manera que la combinación de estos produzcan el mejor resultado con los más altos niveles de calidad y al mínimo costo de producción, es decir de un total de experimentos donde se combinaron los parámetros antes mencionados se obtendrá el mejor y más óptimo. Los objetivos del diseño de parámetros son:

- Identificar qué factores afectan la característica de calidad en cuanto a su magnitud y en cuanto a su variabilidad.
- Definir los niveles “óptimos” en que debe fijarse cada parámetro o factor, a fin de optimizar la operación del producto y hacerlo lo más robusto posible.
- Identificar factores que no afectan substancialmente la característica de calidad a fin de liberar el control de estos factores y ahorrar costos de pruebas.

Para lograr lo anterior Taguchi establece dos herramientas estadísticas que son arreglos ortogonales y gráficas lineales.

Un arreglo ortogonal es una replicación factorial fraccionada donde se combinan los parámetros formando experimentos. El número de experimentos depende de la cantidad de parámetros y de los niveles que estos tengan, el resultado será una tabla de números con información para realizar los experimentos.

La siguiente expresión matemática expresa la cantidad de experimentos, tomado de [Fung and Kang, 2005].

$$La(b)^C, \quad (2.63)$$

donde.

a representa el número de pruebas o condiciones experimentales que se tomarán. Esto es el número de renglones o líneas en el arreglo.

b representa los diferentes niveles a los que se tomará cada factor.

c es el número de efectos independientes que se pueden analizar, esto es el número de columnas.

Existen arreglos ortogonales para experimentos a dos niveles donde se asume solo un efecto de un factor sobre la variable no dependiendo del nivel de otros factores. Sin embargo, arreglos ortogonales para factores con interacciones se producen cuando un factor depende del nivel de otro factor produciendo una interacción entre estos de esta forma el arreglo ortogonal y subsecuente el número de experimentos aumenta.

CAPÍTULO 3

DISEÑO Y CONSTRUCCIÓN DE LAS PROBETAS

3.1 PARÁMETROS GENERALES MECÁNICOS DEL EXPERIMENTO

- Dos probetas de bronce y acero respectivamente se someterán a fricción mediante la potencia de rotación (torque) de un torno de 10CV.
- La probeta de bronce se mantendrá fija mediante una chaveta bloqueada en un anillo. El anillo se sujeta a una luneta (accesorio del torno) y esta a su vez a la bancada del torno.
- La probeta de acero rota en el mandril del torno, la forma de montaje se especificará al final de esta sección.
- Las dos probetas se friccionan mediante la fuerza de aplastamiento que proporciona el contra punto.
- La fuerza de aplastamiento que proporciona el punto a la probeta de bronce es medida mediante una celda de carga, ver Figura 18 .

3.1.1 INSTRUMENTACIÓN: CELDA DE CARGA

Para realizar la medición de la fuerza de aplastamiento se utilizará una celda de carga LEXUS tipo S de 500kg de capacidad, para obtener los valores correspondientes a cada medición es necesario acondicionar la señal emitida por la celda de carga para lo cual se utilizará un amplificador de señal AD 620 y una tarjeta Arduino UNO para adquirir los datos, de esta manera mediante un software de programación se puede visualizar en pantalla los datos obtenidos de la celda de carga a tiempo real.

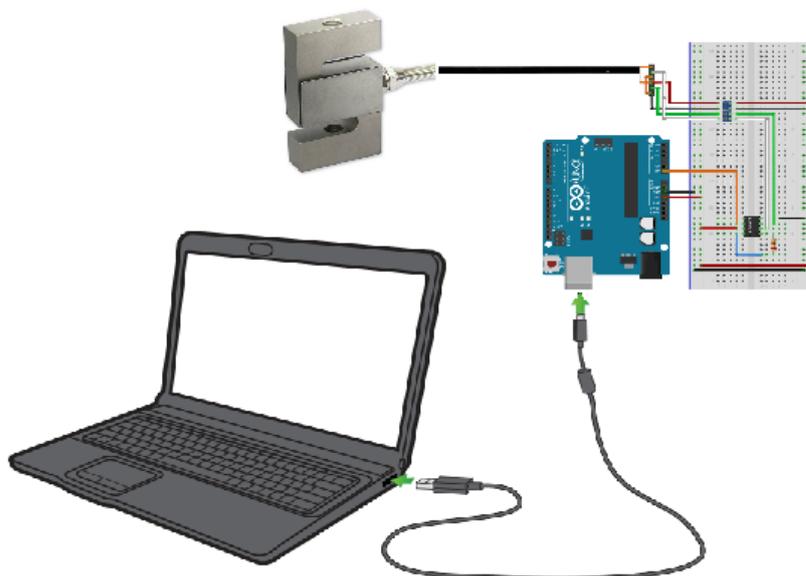


Figura 18: Esquema de Conexión.

Donde el circuito de conexión se representa en la Figura 19, el circuito indica la conexión entre la celda de carga, el amplificador de señal (ya que la señal que entrega la celda esta en el orden de los mili voltios) y el Arduino UNO.

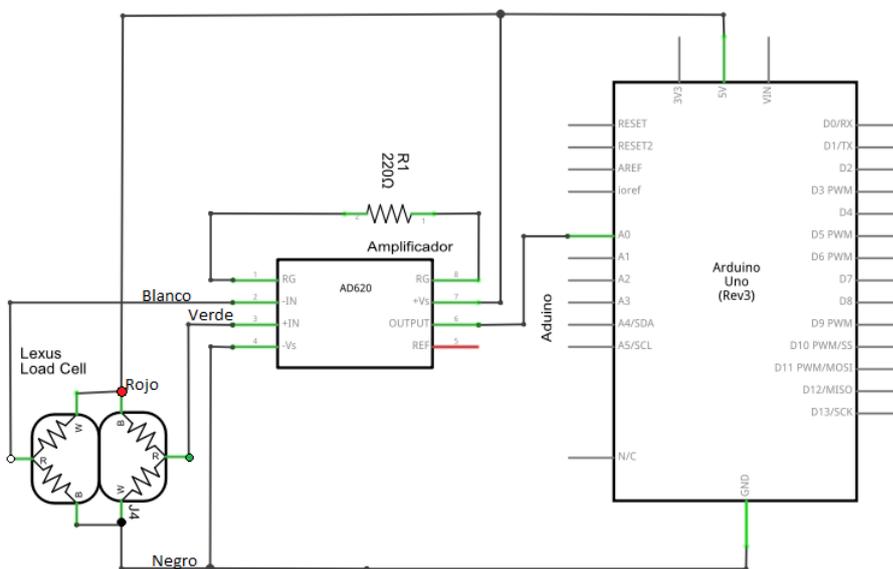


Figura 19: Circuito de Conexión Celda de Carga-Arduino UNO.

La conexión de la Figura 19 se la implementa en un protoboard, donde se añade dos borneras para conectar y desconectar el cable de la celda de carga.

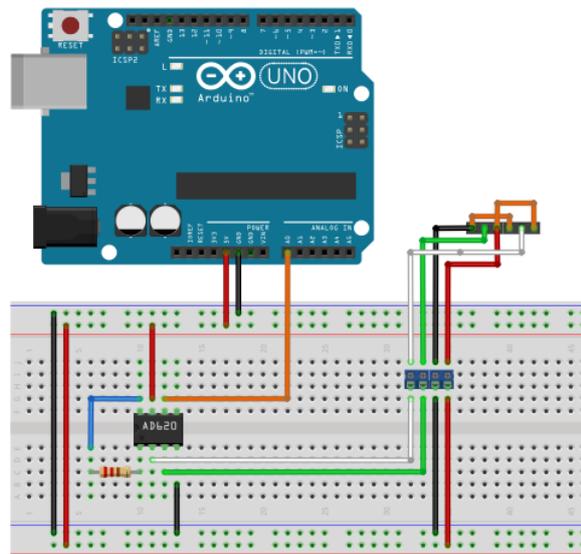


Figura 20: Conexión Protoboard.

Se realiza el programa en donde el valor de entrada se obtiene del voltaje amplificado de la celda de carga entregado por la tarjeta Arduino, se transforma el valor de la señal de voltaje en kilogramos mediante la creación de una función determinada por la medición de diferentes pesos, con esto se obtuvo la relación de voltaje-peso que es igual a $\text{Peso}(\text{kg}) = (\text{Voltaje}(\text{V}) - 1.533) \cdot \frac{12}{0.0932}$ y posteriormente el peso se transforma en fuerza multiplicando por la gravedad.

Los valores se visualizan en pantalla como lo indica la Figura 22.

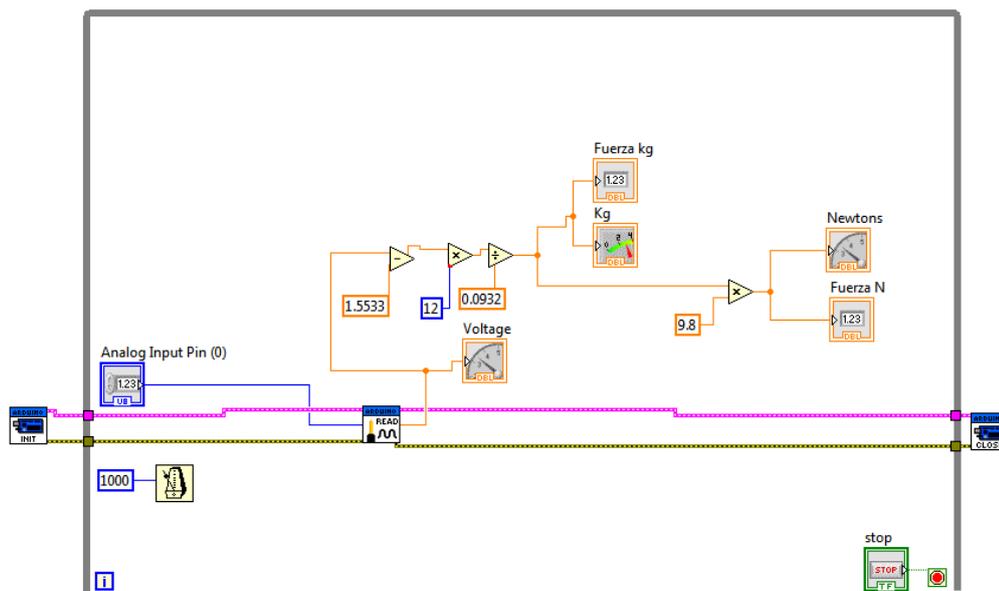


Figura 21: Programa de Adquisición de Datos.

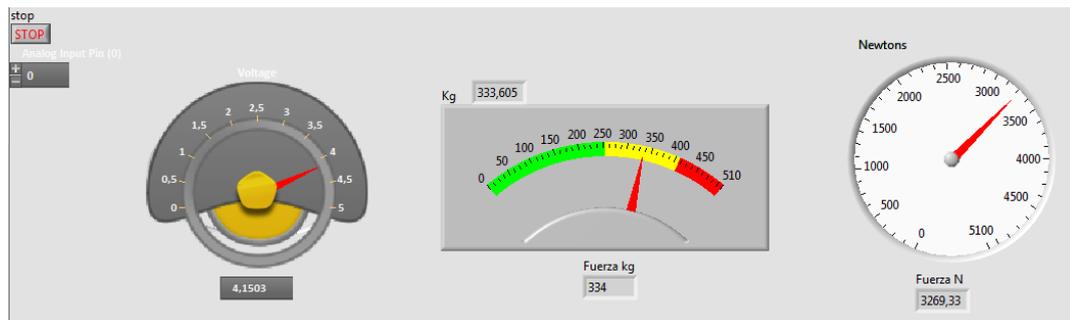


Figura 22: Adquisición y Visualización de Datos.

3.2 DISEÑO DE LA PROBETA DE ACERO

3.2.1 SELECCIÓN DE MATERIAL.

- Los ensayos realizados a partir del año 2003 por el profesor José Guasumba determinaron que la dureza del material en la cara de rozamiento debe ser superior a 62HRC [J.S.Guasumba, 2004].
- Además, [Sato et al., 2001] establece que la dureza alta de los materiales transforma más calor para lograr la soldadura en aluminios.

Se procede a evaluar tres alternativas de aceros mediante una matriz de decisión Tabla 2 con lo cual se escoge aquel que cumpla con los requerimientos del experimento.

Tabla 2

Matriz de Decisión para Selección del Material de la Probeta de Acero.

MODELO DE DECISIÓN	PESO	ALTERNATIVAS					
		Acero DF2		Acero K100		Acero K412	
CRITERIO		RF	A	RF	B	RF	C
Disponibilidad	0.4	10	3.4	5	2	5	2
Dureza > 50HRC	0.15	10	1.5	10	1.5	8	1.2
Res. Fluencia >2200 MPa	0.2	10	2	10	2	10	2
Maquinabilidad	0.1	8	0.8	8	0.8	10	1
Tratamiento Térmico	0.15	10	1.5	10	1.5	10	1.5
TOTAL	1		9.2		7.8		7.7
PRIORIDAD			1		2		3

De esta manera, el material seleccionado para la construcción de la probeta de acero es un DF2 porque reúne las siguientes características:

- Buena combinación de dureza superficial y tenacidad tras el temple y revenido necesario para resistir la fricción del experimento, ver datos de templado en la subsección 3.2.4 .

- La dureza del acero es de 190 Brinell. Y, después del temple y revenido la probeta alcanza 63 HRC de dureza.
- Buena maquinabilidad lo que garantiza la fabricación de la probeta.
- Estabilidad dimensional después del temple, necesario para cumplir con las precisiones dimensionales que el experimento demanda. Ver planos en Anexo B
- Las aplicaciones de este material son: herramientas de corte, matrices, herramientas de medición, elementos y piezas de fricción.

Las propiedades mecánicas a 62 HRC de la probeta de Acero DF2 son:

Tabla 3

Propiedades Mecánicas del Acero DF2.

Propiedad	Sistema SI
Resistencia a la compresión	3040MPa
Límite de rotura	2256MPa
Módulo de elasticidad a 20° C	190GPa
Densidad	7800kg/m ³

Fuente: [Uddeholm, 2002].

3.2.2 DISEÑO GEOMÉTRICO DE LA PROBETA DE ACERO

- La probeta debe poseer una parte dedicada para su sujeción en el mandril del torno, esta sección debe poseer una perforación axial para disipar el calor.
- La probeta debe tener una aleta para disipar el calor y evitar la transferencia de calor por conducción al mandril. De esta forma se reduce el riesgo de elevar la temperatura del mandril y modificar su estructura.
- L4 es la dimensión necesaria para disipar el calor al exterior por medio de las paredes laterales.
- $\Phi 1$ es el diámetro del agujero de la probeta de bronce menos una holgura necesaria para que con el calor, este se dilate y el rozamiento sea sólo en la cara de $\Phi 1$.
- $\Phi 4$, $\Phi 5$ y L5 son las dimensiones mínimas posibles que proporcionan una área mínima para que la transferencia de calor por conducción no sea hacia el mandril.

- La cara de fricción debe ser perpendicular al eje axial. El esquema completo de la probeta de acero se muestra en la Figura 23.
- Las dimensiones guardan armonía entre sí. De la misma forma, en la sección de diseño mecánico se establece las dimensiones que resultan proporcionar el área más crítica. Todas al dimensiones, tolerancias y detalles dibujados bajo la norma INEN se muestran en el Anexo B.

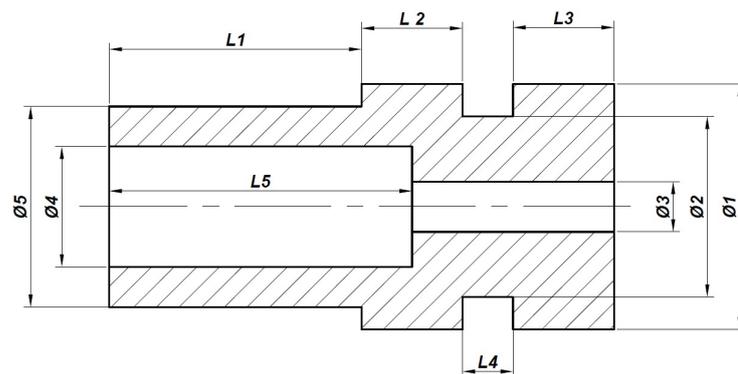


Figura 23: Diseño Geométrico de la Probeta de Acero.

3.2.3 DISEÑO MECÁNICO

En la probeta de acero se asigna una dimensión de 49 mm como diámetro exterior y un diámetro de 36 mm en la menor sección. Ver Figura 24. Estas dimensiones son adecuadas para la transferencia de calor, para la construcción ya que se adquiere un tocho de 2 pulgadas y el arranque de viruta será mínimo y finalmente estas dimensiones se ajustan a las dimensiones del torno. Posteriormente se diseñará la probeta mecánicamente en donde se encontrará el factor de seguridad en operación garantizando su correcto funcionamiento.

3.2.3.1 PARÁMETROS

- La fricción entre el acero y el bronce en el caso más crítico pueden llegar a detenerse, producir rotura en la probeta, producir daños en la caja Norton del torno, daños en el motor eléctrico, o daños en los accesorios, como la luneta y sus pines, en el punto, o en las muelas del mandril mediante esfuerzos de torsión y aplastamiento.
- Las fuerzas de aplastamiento varían entre 110 kg y 500 kg medidos en la celda de carga.

- El tiempo promedio de fricción de los dos materiales es 4 horas.
- Para el diseño mecánico se tomará la temperatura máxima alcanzada en los experimentos anteriores. El valor es de 600 °C [J.S.Guasumba, 2004].
- La probeta será maquinada torneada.
- La probeta será tratada térmicamente.
- El torque máximo del torno depende de las especificaciones técnicas del mismo:
 - Potencia del torno a 2 velocidades 10-10 CV
 - Número de velocidades 18.
 - Valor de velocidades 20-1600 rpm.

3.2.3.2 CÁLCULOS

La potencia del torno es 10 CV, misma que genera un torque máximo en el mandril dependiendo de la revoluciones por minuto del mismo. Estas revoluciones se miden en la parte posterior del mandril con un tacómetro y un cono de duralón.

$$P = 10 \text{ [CV]} \frac{0.73549875 \text{ [kW]}}{1 \text{ [CV]}} = 7.35498 \text{ [kW]},$$

donde.

P es la potencia del torno.

$$\begin{aligned} rev &= 130 \text{ [rpm]} \\ T_{max} &= \frac{P}{rev} \\ T_{max} &= \frac{7.3549(9550)}{130} = 540.26 \text{ [Nm]} \end{aligned} \tag{3.1}$$

donde.

T_{max} es el torque máximo producido en el mandril del torno.

rev el número de revoluciones utilizadas en el experimento.

9550 es un factor de transformación de unidades.

El valor de las revoluciones es el mínimo utilizado en el experimento ya que de esta manera se produce el torque máximo y se diseña la probeta en las condiciones más críticas. En el Capítulo 2 se enunció la Ecuación 2.47 para el cálculo del esfuerzo de torsión en base al torque producido por la potencia del torno, esta fórmula también

usa el segundo momento polar de inercia del área (Ecuación 2.49). Se toma para los cálculos la sección de menor valor del área ya que es este se produce un esfuerzo máximo.

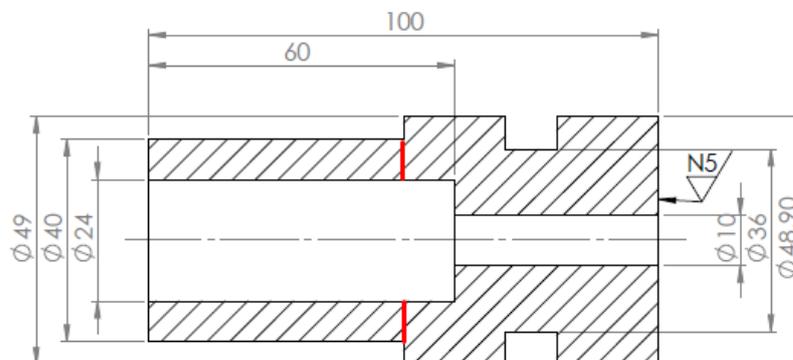


Figura 24: Área Crítica de Diseño.

$$\begin{aligned}
 J &= \frac{\pi}{32}(d_{ox}^4 - d_{ix}^4) \\
 J &= \frac{\pi}{32}(40^4 - 24^4) \\
 J &= 2.188 \times 10^{-7} \text{ [m}^4\text{]}, \tag{3.2}
 \end{aligned}$$

donde.

J es el segundo momento polar de inercia del área de la sección crítica.

d_{0x} es el diámetro exterior de dicha sección.

d_{ix} es el diámetro interior de dicha sección. Ver Figura 24

Con este valor de la Ecuación 3.2 del segundo momento polar de inercia del área y el torque máximo de la Ecuación 3.1 se procede a calcular el esfuerzo de torsión en el área más crítica.

$$\begin{aligned}
 \tau &= \frac{T\rho}{J} \\
 \tau &= \frac{540.26 \text{ [Nm]}18 \text{ [mm]} \quad 1 \text{ [m]}}{2.188 \times 10^{-7} \text{ [m}^4\text{]} \quad 1000 \text{ [mm]}} \\
 \tau &= 49.394 \text{ [MPa]}, \tag{3.3}
 \end{aligned}$$

donde.

τ es el esfuerzo que produce el torque máximo en la sección crítica antes mencionada.

ρ es el radio exterior de la sección crítica donde se produce el torque máximo.

La fuerza de aplastamiento que se genera en el volante del contrapunto y que es mediada por medio de la celda de carga, se tomará el valor máximo de 5000N aplicada en la parte posterior de la probeta de bronce. Esta fuerza se proyectará en el área de la sección crítica del acero más el valor de la fuerza de aplastamiento que genera el esfuerzo por la dilatación térmica de la probeta de bronce.

Primero se calcula el esfuerzo térmico que sufre la probeta de bronce mediante la Ecuación 2.62 y la fuerza resultante de este esfuerzo se proyectará en la misma área en donde se medirá la fuerza de aplastamiento con la celda de carga, para este caso el módulo de Young del bronce decrece con el incremento gradual de temperatura como se aprecia en la Figura. 25, Las propiedades de Bronce se toman de la Tabla. 7

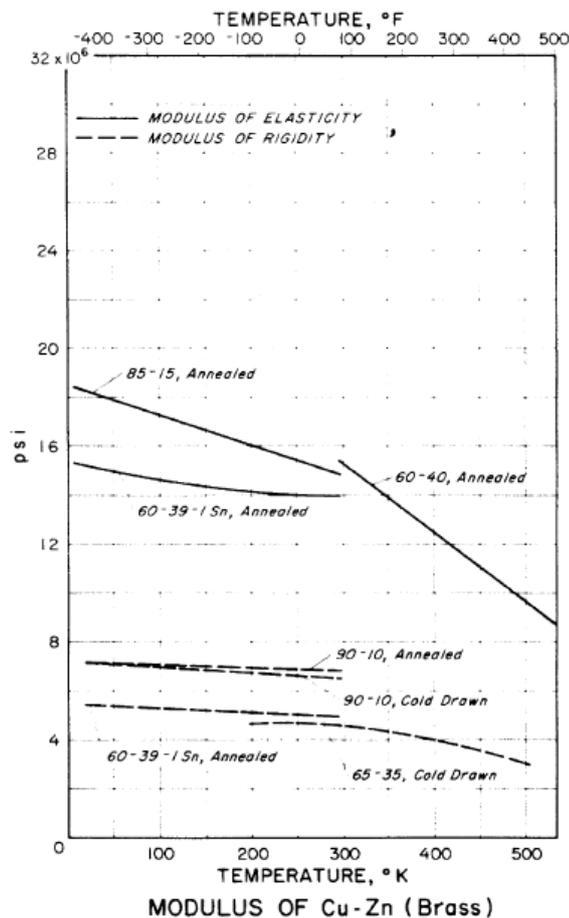


Figura 25: Módulo de Elasticidad del Bronce Dulce.

Fuente: [Reed and Mikesell, 1967].

Para determinar el esfuerzo producido por la dilatación térmica debido a un incremento de temperatura de $T_a = 30^\circ\text{C}$ a $T_f = 600^\circ\text{C}$ con una generación de calor de $\dot{q} = 6.749 \times 10^4 \text{W/m}^3$, en una longitud de $L_b = x = 0.22\text{m}$ con un coeficiente de conductividad térmica del bronce de $k = 123 \text{W/mK}$, las condiciones dimensionales de $x_1 = 0.22\text{m}$ y $c = 0.22\text{m}$, un módulo de elasticidad disminuido por la temperatura $E_b = 62\text{GPa}$ y un coeficiente de expansión lineal $\alpha = 20.9 \mu\text{m/mK}$.

$$\begin{aligned}
 \sigma_b &= -E_b \alpha \Delta T(x) + \frac{1}{2c} \int_0^c E_b \alpha \left(T_f + \frac{\dot{q}}{2k} (x_1^2 - x^2) - T_a \right) dx \\
 &+ \frac{3x}{2c^2} \int_0^c E_b \alpha \left(T_f + \frac{\dot{q}}{2k} (x_1^2 - x^2) - T_a \Delta T(x) \right) x dx \\
 \sigma_b &= -62\text{GPa} \cdot 20.9 \mu\text{m/mK} \cdot 570^\circ\text{C} + 362.389\text{MPa} + 541.431\text{MPa} \\
 \sigma_b &= 190.523\text{MPa}
 \end{aligned} \tag{3.4}$$

Se obtiene el esfuerzo producido por la variación de temperatura y la generación de calor, se concluye que se va deformar de manera plástica al alcanzar esta temperatura crítica de experimentación. Se obtiene el valor de la deformación por medio de la ley de Hook:

$$\begin{aligned}
 \epsilon &= \frac{\sigma_b}{E_b} \\
 \epsilon &= \frac{190.523\text{MPa}}{62\text{GPa}} \\
 \epsilon &= 3.07 \times 10^{-3}
 \end{aligned} \tag{3.5}$$

$$\begin{aligned}
 L_f &= \epsilon \cdot L_b + L_b = 0.22067\text{m} \\
 \Delta L &= L_f - L_b = 0.657\text{mm}
 \end{aligned} \tag{3.6}$$

Así como la fuerza necesaria para comprimir el bronce en el área de medición de la fuerza de aplastamiento con la celda de carga, ésta área representa la superficie de un cono cuya área superficial es $A_{cono} = \pi r g_{gen}$, donde r es el radio de la base del cono y g_{gen} es la generatriz del cono:

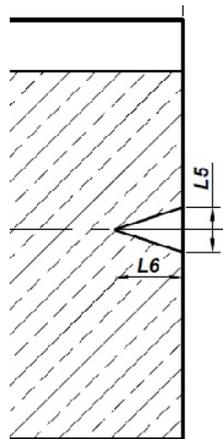


Figura 26: Área de Medición de la Fuerza (Celda de Carga).

$$\begin{aligned}
 A_{mb} &= \pi (r_c g_{gen}) \\
 A_{mb} &= \pi [(10\text{mm}) (10\text{mm})] \\
 A_{mb} &= 3.142 \times 10^{-4} \text{m}^2
 \end{aligned} \tag{3.7}$$

$$\begin{aligned}
 F_c &= \sigma_b \cdot A_{mb} \\
 F_c &= 190.523 \text{MPa} \cdot 3.142 \times 10^{-4} \text{m}^2 \\
 F_c &= 59690 \text{N}
 \end{aligned} \tag{3.8}$$

El área donde están proyectada la Fuerza de Aplastamiento y la Fuerza de Compresión Térmica es el área de la sección crítica de la probeta de acero.

$$\begin{aligned}
 A_c &= \frac{\pi}{4} (d_{ox}^2 - d_{ix}^2) \\
 A_c &= \frac{\pi}{4} (40^2 - 24^2) \\
 A_c &= 804.248 [\text{mm}^2],
 \end{aligned} \tag{3.9}$$

donde.

A_c es el área de la sección crítica.

La Ecuación 3.10 enuncia la forma de calcular el esfuerzo de aplastamiento que se produce en el área crítica, donde intervienen la fuerza de aplastamiento que proporciona el contra punto más la fuerza que se generará por la dilatación del bronce. Se toma

el valor de la Ecuaciones 3.9 y 3.8 el cálculo es el siguiente:

$$\begin{aligned}\sigma_{aplas} &= \frac{F + F_c}{A} \\ \sigma_{aplas} &= \frac{64690 \text{ [N]}}{804.248 \text{ [mm}^2\text{]}} \\ \sigma_{aplas} &= 80.44 \text{ [MPa]},\end{aligned}\tag{3.10}$$

donde.

σ_{aplas} es el esfuerzo que produce la fuerza de aplastamiento.

Se procede a combinar los esfuerzos con la fórmula de Von Mises con la Ecuación 2.50. Se toma los valores de las Ecuaciones 3.3 y 3.10.

$$\begin{aligned}\sigma &= \sqrt{\sigma_{aplas}^2 - 3\tau^2} \\ \sigma &= \sqrt{80.44^2 - 3(49.394)^2} \\ \sigma &= 117.428 \text{ [MPa]}\end{aligned}\tag{3.11}$$

donde.

σ es el esfuerzo combinado que actúa en dicha sección.

Con las fórmulas 2.51 y 2.52 se calculan los esfuerzos fluctuantes, es decir el componente de la amplitud y el componente del esfuerzo medio. Estos valores son necesarios para diseñar a fatiga el elemento y aplicar un criterio de falla para buscar la seguridad en operación de la probeta de acero.

$$\begin{aligned}\sigma_a &= \frac{\sigma_{max} - \sigma_{min}}{2} \\ \sigma_a &= \frac{117.428 \text{ [MPa]} - 0 \text{ [MPa]}}{2} \\ \sigma_a &= 58.714 \text{ [MPa]}\end{aligned}\tag{3.12}$$

$$\begin{aligned}\sigma_m &= \frac{\sigma_{max} + \sigma_{min}}{2} \\ \sigma_m &= \frac{117.428 \text{ [MPa]} + 0 \text{ [MPa]}}{2} \\ \sigma_m &= 58.714 \text{ [MPa]},\end{aligned}\tag{3.13}$$

donde.

σ_{max} es el esfuerzo combinado de Von Mises dado en la Ecuación 3.11.

σ_{min} es cero ya que la fibra más alejada está en carga y descarga.

σ_a es la componente de la amplitud del esfuerzo.

σ_m es el esfuerzo que genera la componente del intervalo medio.

La resistencia del material se la tomó de las especificaciones técnicas de Iván Bohman, mismas que están especificadas en la sección de selección del material. Esta resistencia se la reduce ya que hay ciertos factores que la modifican, entre estas podemos citar como la más importante a la temperatura la cuál alcanza a 600°C en experimentos anteriores [J.S.Guasumba, 2004], están presentes factores como el tipo de maquinado, la forma, la superficie, la carga y la confiabilidad. A continuación se procede a modificar la resistencia con estos factores mencionados.

El límite de resistencia a la fatiga no modificado se establece mediante el límite de resistencia a la rotura con la Ecuación 6.8 del libro de [Budynas et al., 2008]. La Ecuación 2.53 y se toma para este caso, se tiene:

$$S_{enn} = 700 \text{ [MPa]} \quad S_{ut} > 1400 \text{ [MPa]} \quad (3.14)$$

En las especificaciones técnicas se enunció la resistencia a la rotura la cual sobrepasa los 1400 MPa por tanto se toma la resistencia no modificada a la fatiga como 700 MPa, Esta resistencia se modificará con la Ecuación 2.54 y con los factores de la siguiente manera:

$$S_e = S_{enn} k_a k_b k_c k_d k_e \quad (3.15)$$

Las fórmulas y las imágenes de las tablas para cálculo de los factores de modificación de resistencia se encuentran en el Capítulo 6 del libro [Budynas et al., 2008] y son los siguientes: Factor de superficie k_a : Este factor depende la calidad de acabado superficial de una parte en particular y de la resistencia a la tensión. Las coordenadas de los puntos de datos se compilan en la Figura 4 donde interviene los diversos acabados comunes de los elementos de máquinas y posteriormente se ingresan en la Ecuación 3.16 para determinar el factor de superficie.

$$k_a = aS_{ut}^b \quad (3.16)$$

$$k_a = (4.51)(2256)^{-0.265}$$

$$k_a = 0.583 \quad (3.17)$$

donde.

4.51 es un dato tomado de la Tabla 4 para acabado por maquinado.

−0.265 es un dato adimensional.

2256 es la resistencia a la rotura del material DF2 en MPa, sin embargo en la Ecuación 3.16 no se ingresan las unidades porque el factor no poseen dimensiones.

Tabla 4

Factores a y b para Diferentes Maquinados.

Surface Finish	Factor a		Exponent b
	S_{utr} kpsi	S_{utr} MPa	
Ground	1.34	1.58	−0.085
Machined or cold-drawn	2.70	4.51	−0.265
Hot-rolled	14.4	57.7	−0.718
As-forged	39.9	272.	−0.995

From C.J. Noll and C. Lipson, "Allowable Working Stresses," *Society for Experimental Stress Analysis*, vol. 3, no. 2, 1946 p. 29. Reproduced by O.J. Horger (ed.) *Metals Engineering Design ASME Handbook*, McGraw-Hill, New York. Copyright © 1953 by The McGraw-Hill Companies, Inc. Reprinted by permission.

Fuente: [Budynas et al., 2008].

Factor de Tamaño k_b : Para una sección redonda hueca rotatoria se debe establecer un diámetro equivalente el cual obedece al 95 % del esfuerzo. La Ecuación para determinar el diámetro equivalente es:

$$d_e = 0.37d$$

$$d_e = 0.37(36 \text{ [mm]})=13.32 \text{ [mm]} \quad (3.18)$$

Se toma el diámetro equivalente y verificando que este esté en el rango establecido en la Ecuación 3.19 . La Ecuación para determinar el factor de tamaño es:

$$k_b = 1.24d^{-0.107} \quad 2.79 \leq d \leq 51 \text{ [mm]} \quad (3.19)$$

$$k_b = 1.24(13.32)^{-0.107}$$

$$k_b = 0.925 \quad (3.20)$$

Factor de carga k_c : Se toma el esfuerzo torsional de la Ecuación 3.3 para determinar el valor:

$$k_c = 0.557 \quad (3.21)$$

Factor de temperatura k_d : Este depende del límite de resistencia a la fatiga de una viga rotativa a temperatura ambiente por tanto se emplea la siguiente Ecuación:

$$k_d = \frac{S_T}{S_{RT}} \quad (3.22)$$

Tabla 5

Factores de Corrección por Temperatura.

Temperature, °C	S_T/S_{RT}	Temperature, °F	S_T/S_{RT}
20	1.000	70	1.000
50	1.010	100	1.008
100	1.020	200	1.020
150	1.025	300	1.024
200	1.020	400	1.018
250	1.000	500	0.995
300	0.975	600	0.963
350	0.943	700	0.927
400	0.900	800	0.872
450	0.843	900	0.797
500	0.768	1000	0.698
550	0.672	1100	0.567
600	0.549		

Fuente: [Budynas et al., 2008].

Sin embargo en la Tabla 5 establece el valor directo del factor de corrección por efecto de la temperatura el cual es el siguiente:

$$k_d = 0.549 \quad (3.23)$$

Factor de confiabilidad k_e : El factor de confiabilidad depende de las condiciones de operación del elemento. En el caso de este experimento se toma el torque máximo como una fuerza de torsión que podría estar aplicado en su totalidad en la sección

crítica. Sin embargo, esta fuerza de torsión no está aplicada de manera directa a la probeta ya que está transmitida a la probeta de bronce. Por esta razón el factor de confiabilidad es el siguiente:

$$k_e = 1 \quad (3.24)$$

Se aplica la Ecuación 3.15, se calcula la resistencia a la fatiga modificada a través de todos los factores antes calculados.

$$\begin{aligned} Se &= 700 \text{ [MPa]}(0.583)(0.925)(0.557)(0.549)(1) \\ Se &= 119.53 \text{ [MPa]} \end{aligned} \quad (3.25)$$

Se aplica la Ecuación 3.26 de la recta de Soderberg para relacionar los esfuerzos fluctuantes dados en las Ecuaciones 3.12 y 3.13 con la resistencia del material y la resistencia a la fatiga dado en la Ecuación 3.25 se busca el factor de seguridad. A continuación se muestra los cálculos para determinar el factor de seguridad de la probeta de acero.

$$\frac{\sigma_a}{Se} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}} = \frac{1}{F_s} \quad (3.26)$$

$$\begin{aligned} F_s &= \frac{1}{\frac{\sigma_a}{Se} + \frac{\sigma_m}{S_{ut}}} \\ F_s &= \frac{1}{\frac{58.714}{119.53} + \frac{58.714}{2256}} = 1.93 \end{aligned} \quad (3.27)$$

El valor de la Ecuación 3.27 es un valor de seguridad aceptable y sirve de parámetro para determinar que los diámetros de la sección crítica se escogieron de manera adecuada. Sin embargo, en las condiciones de operación la probeta transmite el torque a la probeta de bronce y este a su vez a chaveta y posteriormente a los pines de luneta del torno. Por esta razón, en las siguientes secciones se determinará el factor de seguridad de los pines de la luneta.

3.2.4 TRATAMIENTO TÉRMICO DE LA PROBETA DE ACERO ARNE DF2

La probeta de acero necesita unas propiedades específicas para soportar el desgaste ocasionado por la fricción y la fuerza de aplastamiento por lo que la probeta de acero necesita una dureza elevada mayor a 62HRC para que el desgaste en el acero sea el mínimo ya que se lo aplastará y friccionará contra un material menos resistente al desgaste como el bronce dulce para lo cual se someterá a la probeta de acero a un

tratamiento térmico de temple y revenido.

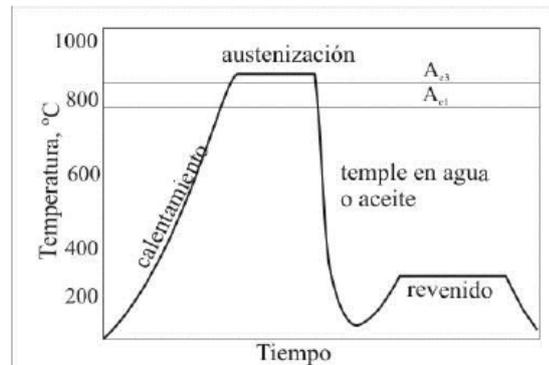


Figura 27: Curso de la Temperatura en el Temple Ordinario.

Fuente: [Nacional,].

3.2.4.1 TEMPLE

La temperatura de temple se escoge de la Figura 28 de acuerdo a la dureza que se necesita, que en este caso es 62 HRC la temperatura es de: 200°C con una temperatura de austenización de 820°C

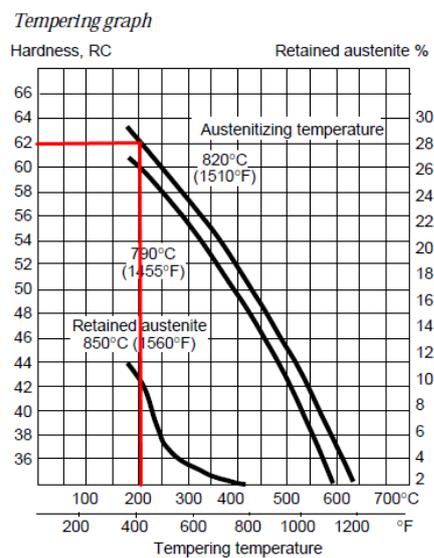


Figura 28: Temperatura de Temple.

Fuente: [Uddeholm, 2002].

3.2.4.2 REVENIDO

La temperatura escogida para realizar el revenido depende de la dureza requerida en este caso 62HRC y viene dada por la Figura 29 proporcionada por el fabricante, que recomienda que el tiempo el cual se debe mantener esta temperatura es de dos horas.

Diagrama de revenido para ASSAB DF-2

Valores aproximados. Probeta de $\varnothing 49$ mm. Enfriado en aceite. Tiempo de mantenimiento 2 horas.

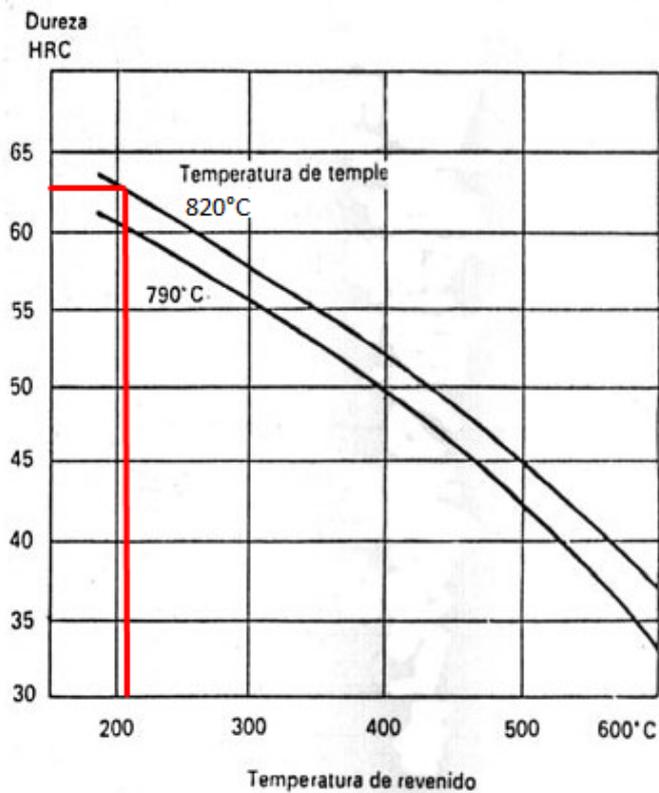


Figura 29: Temperatura de Revenido.

Fuente: [Uddeholm, 2002].

Entonces en el diagrama TTT del acero ASSAB DF2 se dibuja el tratamiento térmico como se ve en la Figura 30.

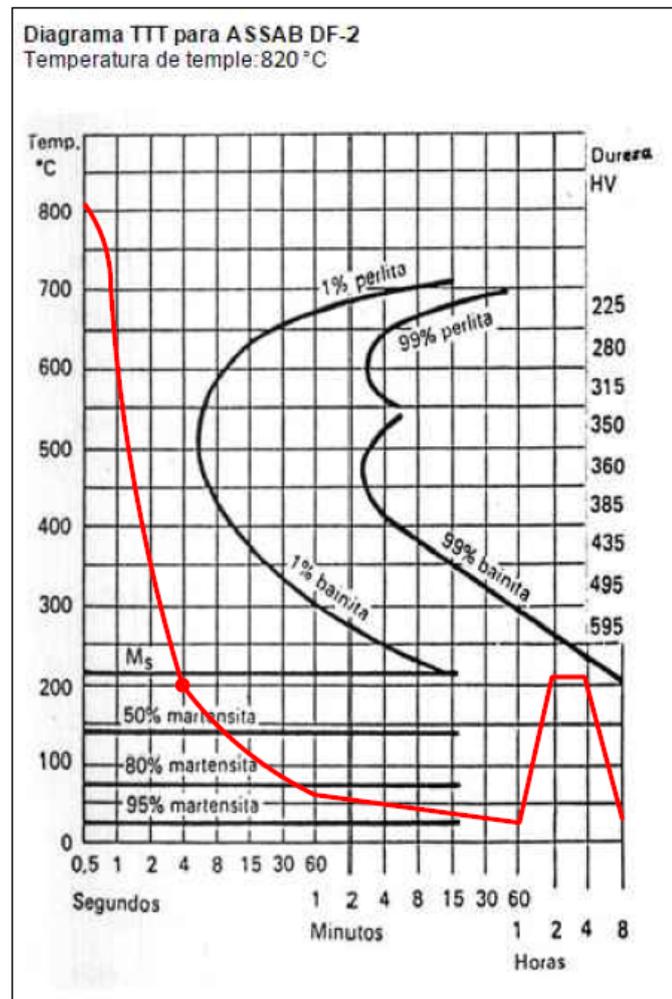


Figura 30: Diagrama TTT para ASSAB DF2.
Fuente: [Uddeholm, 2002].

3.3 DISEÑO DE LA PROBETA DE BRONCE.

3.3.1 SELECCIÓN DE MATERIAL

- Los ensayos realizados a partir del año 2003 por el profesor José Guasumba determinan que la probeta debe estar fija y debe poseer una dureza relativamente baja.
- La probeta deberá poseer una alta conductividad térmica.
- La probeta deberá ser no ferrosa, ya que la fricción podría provocar soldadura entre materiales.

Tabla 6

Matriz de Decisión para Selección del Material de la Probeta de Bronce.

MODELO DE DECISIÓN		ALTERNATIVAS			
		Bronce Dulce UNS 35800		Bronce Fosfórico SAE 640	
CRITERIO	PESO	RF	(A)	RF	(B)
Disponibilidad	0,5	10	5	9	4,5
Dureza ≤ 75 Rockwell B	0,2	9	1,8	8,5	1,7
Res. Fluencia > 140 MPa	0,2	10	2	10	2
Maquinabilidad	0,1	8	0,8	6	0,6
TOTAL	1		9,6		8,8
PRIORIDAD			1		2

- Por disponibilidad en el mercado se escoge un bronce dulce (latón) UNS C38500 con las siguientes propiedades.

Tabla 7

Propiedades Mecánicas del Bronce UNS C35800.

Propiedad	Sistema SI
Resistencia a la tensión	140MPa
Límite de rotura	415MPa
Módulo de elasticidad a 20° C	97GPa
Densidad	8470kg/m ³

Fuente: [Davis et al., 2001].

3.3.2 DISEÑO GEOMÉTRICO

- La distancia L1 es necesaria para ofrecer resistencia a la deformación térmica por el incremento de temperatura.
- La distancia L2 debe ser superior a 210 ya que la sujeción con la luneta demanda esta distancia. De no ser así, la bancada del torno no permite el deslizamiento y no se podría friccionar los dos materiales.
- La distancia L3 y el diámetro $\Phi 1$ son dimensiones requeridas porque en el arranque en frío, o en el caso que se produzca desprendimiento de bronce se pueda acumular en este agujero. De igual manera, cuando se eleva la temperatura se producirá deformaciones axiales y este agujero servirá para acumular material.
- La distancia L4 y el diámetro $\Phi 2$ son necesarias para que se acople con la geometría del acero.

- Las distancias L5 y L6 forman un cono donde se acopla la geometría del punto de la celda de carga a través de un tornillo maquinado con esta forma. Todas estas dimensiones se pueden observar en la figura 31.
- La distancia L7 es la longitud de la chaveta que permite deslizar la probeta de bronce en esta.
- La distancia L8 es la separación entre termocuplas, este valor no estará especificado en el plano de detalle, sin embargo, este valor depende del número de termocuplas y es de 20 cuando son 10 termocuplas.

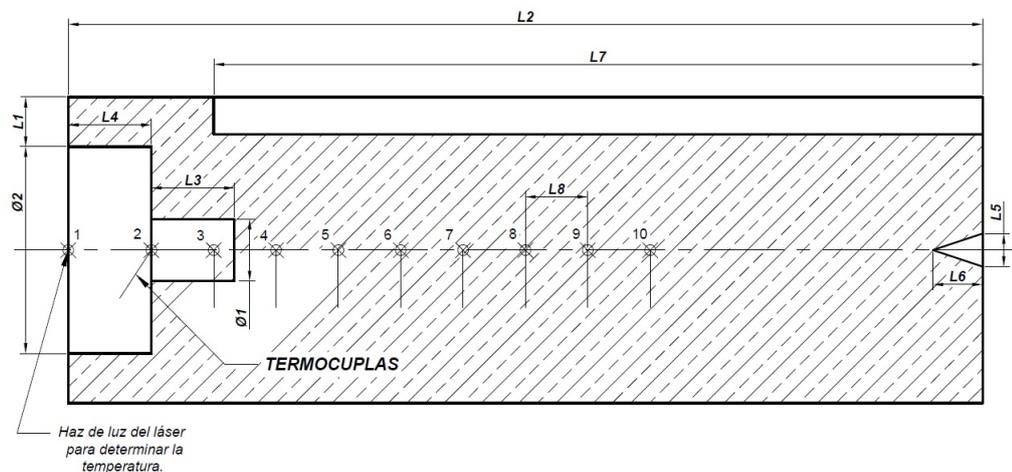


Figura 31: Diseño Geométrico de la Probeta de Bronce.

3.3.3 DISEÑO MECÁNICO

La probeta de bronce permanecerá estática friccionando con la rotación de la probeta de acero. La fricción se da solo en una cara y por tanto no se generan esfuerzos de fricción en las caras laterales. Por otra parte en la sujeción del anillo existe holgura para que este se deslice en la chaveta y todo el esfuerzo que produce el torque es absorbido por la resistencia de la chaveta, así de esta manera, la probeta de bronce no estará sometida a torsión. Sin embargo, cuando las temperaturas se elevan se produce una dilatación volumétrica en los materiales los cuales generan esfuerzos térmicos. Estos esfuerzos térmicos en la probeta de bronce y en el anillo de sujeción serán diferentes ya que son de distintos materiales produciéndose una diferencia de esfuerzo el cual comprime a la probeta de bronce y al anillo de sujeción. Por tanto el bronce esta sometido a la compresión que el anillo genera por el cambio de temperatura de la siguiente manera:

$$\sigma_{(c)} = -\frac{3\alpha(\Delta T)E}{1-\nu}, \quad (3.28)$$

donde.

α es el coeficiente de dilatación térmica.

ΔT es la variación de temperatura que se mide en la probeta de bronce.

E es el módulo de Young del bronce.

ν es el coeficiente de relación de Poisson del bronce.

La Ecuación 3.28 fue tomada de [Budynas et al., 2008].

Se reemplaza los datos tomados de las especificaciones técnicas los materiales detalladas en el Anexo C, se tiene:

$$\begin{aligned} \sigma_{bronce(c)} &= -\frac{3(18.7 * 10^{-6} [1/^{\circ}\text{C}])(580 - 30) [^{\circ}\text{C}](82740 [\text{MPa}])}{1 - 0.31} \\ \sigma_{bronce(c)} &= -3700 [\text{MPa}], \end{aligned} \quad (3.29)$$

Donde.

$\sigma_{bronce(c)}$ es el esfuerzo térmico que produce la dilatación volumétrica del bronce.

Note que el módulo de elasticidad es menor que el descrito en las propiedades ya que este disminuye con la temperatura, el dato es tomado de [Reed and Mikesell, 1967].

La temperatura máxima alcanzada en el bronce en la sección de ubicación del anillo es de 580°C y la temperatura ambiente es de 30°C.

Se toma la Ecuación 3.28 para calcular el esfuerzo de dilatación volumétrico del anillo cuyo material es un acero 1024 y que sus propiedades se describirán en la Sección 3.4 se tiene:

$$\begin{aligned} \sigma_{acero(c)} &= -\frac{3(10.8 * 10^{-6} [1/^{\circ}\text{C}])(520 - 30) [^{\circ}\text{C}](170000 [\text{MPa}])}{1 - 0.31} \\ \sigma_{acero(c)} &= -3775 [\text{MPa}] \end{aligned} \quad (3.30)$$

Donde.

$\sigma_{acero(c)}$ es el esfuerzo térmico que produce la dilatación volumétrica del acero en el anillo.

La temperatura máxima medida en el anillo con el láser fue de 520 °C.

Se toma los valores de las Ecuaciones 3.29 y 3.30 se nota que el acero se dilata

en menor cantidad que el bronce por tanto la probeta de bronce estará sometido a un esfuerzo de compresión (signo menos) dado por la diferencia de los esfuerzos térmicos descritos así:

$$\begin{aligned}
 \sigma_{com} &= \sigma_{bronce(c)} - \sigma_{acero(c)} \\
 \sigma_{com} &= -3700 - (-3775) \\
 \sigma_{com} &= -75 \text{ [MPa]}
 \end{aligned}
 \tag{3.31}$$

El valor de la Ecuación 3.31 se utilizará para diseñar tanto la probeta de bronce y el anillo de sujeción ya que por la ley de acción y reacción ambos materiales están sometidos a la misma carga. El bronce es macizo, no posee concentradores de esfuerzos y las temperaturas son las máximas alcanzadas por tanto:

$$\begin{aligned}
 FS_{bronce} &= \frac{S_{ybronce}}{\sigma_{com}} \\
 FS_{bronce} &= \frac{140 \text{ [MPa]}}{75 \text{ [MPa]}} \\
 FS_{bronce} &= 1.86
 \end{aligned}
 \tag{3.32}$$

El valor de la Ecuación 3.32 es muy variable ya que si la temperatura incrementa este valor cambiará, inclusive puede descender hasta valores menores que 1, sin embargo, estos elementos no se fracturarán ya que a altas temperaturas el módulo de elasticidad también decrece y los materiales se comportan elásticamente ya que son más dúctiles.

3.4 DISEÑO DEL ANILLO DE SUJECIÓN.

3.4.1 MATERIAL SELECCIONADO

- Disponibilidad en el mercado en tubería sin costura y con los diámetros requeridos
- De fácil maquinado y fabricación.
- Se selecciona un SAE 1024 en barra perforada con las siguientes características:

Tabla 8

Propiedades Mecánicas del Acero SAE 1024.

Propiedad	Sistema SI
Resistencia a la tensión	804MPa
Límite de rotura	843.3MPa
Módulo de elasticidad a 20° C	200GPa
Densidad	7800kg/m ³

Fuente: [Bohman, 2016].

3.4.2 DISEÑO GEOMÉTRICO

El anillo de sujeción es un elemento que servirá en el experimento para mantener una posición constante de la probeta de bronce en la luneta y esta a su vez en la bancada del torno. De esta forma la probeta de bronce no gira ya que se bloquea mediante la chaveta en el anillo de sujeción. Este anillo posee tres agujeros no pasantes donde ingresan los pines de la luneta. La luneta se fija con un tornillo a la bancada y todo el sistema permanece estático.

- La dimensión $\Phi 1$ es el diámetro de la probeta de bronce más cierta holgura para que el ajuste sea deslizante. Ver en Anexo B los planos de los elementos.
- La dimensión $\Phi 2$ se establece en el diseño mecánico de la pieza. La distancia poseerá el material necesario para soportar el esfuerzo generado por la dilatación que el bronce producirá en operación.
- La distancia L1 es la adecuada para que este se mantenga estable en la luneta del torno.
- La distancia L2 es la mitad de la altura estándar de la chaveta. Todas estas dimensiones se pueden observar en la Figura 32.
- Las dimensiones L3, L4, $\Phi 3$ y $\Phi 4$ forman la geometría adecuada de los pines de la luneta. Los planos con tolerancias, detalles y ajustes se pueden observar en el Anexo B.

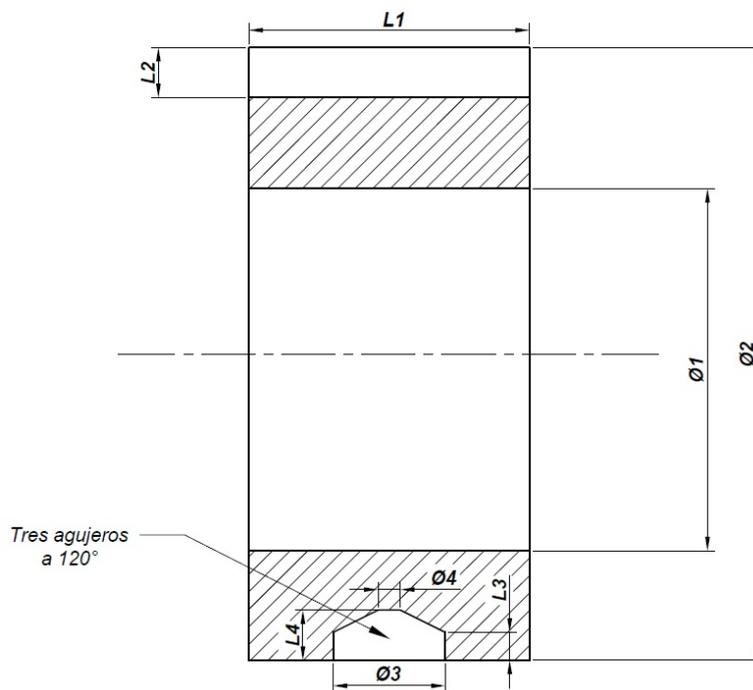


Figura 32: Diseño Geométrico del Anillo de Sujeción.

3.4.3 DISEÑO MECÁNICO

El valor determinado en la Ecuación 3.31 es el esfuerzo al que está sometido el anillo de sujeción ejerciendo una presión interna y generando esfuerzos tangenciales y radiales de la siguiente manera:

$$\sigma_{tan_{anillo}} = \frac{r_i^2 p_i}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 + \frac{r_o^2}{r_i^2} \right), \quad (3.33)$$

donde.

$\sigma_{tan_{anillo}}$ es el esfuerzo tangencial que se genera en el anillo.

$r_i = 74$ es el diámetro interior del anillo.

$r_o = 110$ es el diámetro exterior del anillo.

$p_i = \sigma_{com}$ es la presión interna.

Note que no se diseña como si fuese recipiente de pared delgada ya que $t/r_i = 18/74 = 0.24$ y solo se diseña con este concepto cuando esta relación es menor que 0.1.

La Ecuación 3.33 fue tomada de [Budynas et al., 2008] Capítulo 3, Ecuación 3-50. Se reemplaza los datos y se tiene:

$$\begin{aligned}\sigma_{tan_{anillo}} &= \frac{37^2 [\text{mm}^2](75 [\text{MPa}])}{55^2 [\text{mm}^2] - 37^2 [\text{mm}^2]} \left(1 + \frac{55^2 [\text{mm}^2]}{37^2 [\text{mm}^2]}\right) \\ \sigma_{tan_{anillo}} &= -198.809 [\text{MPa}]\end{aligned}\quad (3.34)$$

De la misma manera se calcula el esfuerzo radial que se produce por la acción de la presión interna.

$$\sigma_{r_{anillo}} = \frac{r_i^2 p_i}{r_o^2 - r_i^2} \left(1 - \frac{r_o^2}{r_i^2}\right), \quad (3.35)$$

donde.

$\sigma_{r_{anillo}}$ es el esfuerzo radial que se genera en el anillo.

La Ecuación 3.35 fue tomada de [Budynas et al., 2008] Capítulo 3, Ecuación 3-50. Se reemplaza los datos y se tiene:

$$\begin{aligned}\sigma_{r_{anillo}} &= \frac{37^2 [\text{mm}^2](75 [\text{MPa}])}{55^2 [\text{mm}^2] - 37^2 [\text{mm}^2]} \left(1 - \frac{55^2 [\text{mm}^2]}{37^2 [\text{mm}^2]}\right) \\ \sigma_{r_{anillo}} &= 74.92 [\text{MPa}]\end{aligned}\quad (3.36)$$

El esfuerzo mayor es el tangencial el mismo que aumenta por la concentración de esfuerzos que se produce por la presencia de los agujeros en el anillo, así:

$$\sigma_{a(real)} = \sigma_{tanillo} * kt, \quad (3.37)$$

La Ecuación 3.37 fue tomada de [Budynas et al., 2008] Capítulo 5.

El factor de concentración de esfuerzo visto en la Figura 33 es 2.2 con $d/w = 22/50 = 0.44$, donde 22 es el diámetro del agujero donde ingresa el pin en el anillo y 50 es el ancho del anillo, por tanto:

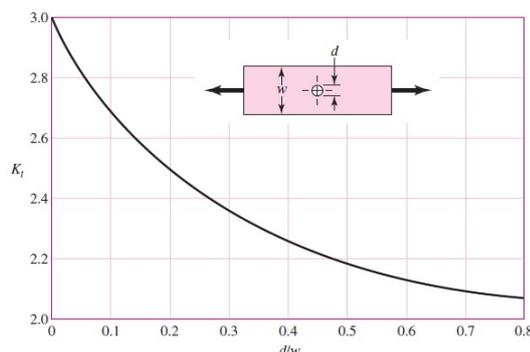


Figura 33: Concentrador de Esfuerzo para Elementos Sometido a Tracción.

Fuente: [Budynas et al., 2008].

$$\sigma_{a(real)} = 198.809 \text{ [MPa]} * 2.2 = 437.38 \text{ [MPa]} \quad (3.38)$$

La seguridad del elemento se busca comparando con el límite de fluencia del material ya que este no está sometido a carga cíclica usando el valor de la Ecuación 3.38.

$$FS_{anillo} = \frac{S_{anillo}}{\sigma_{a(real)}} = \frac{804 \text{ [MPa]}}{437.38 \text{ [MPa]}} = 1.83 \quad (3.39)$$

EL valor de la Ecuación 3.39 es muy variable como se enunció en el diseño de la probeta de bronce ya que este valor depende de la temperatura. Sin embargo, el incremento de temperatura hará que el material sea más dúctil por tanto este no se fracturará.

3.5 DISEÑO DE LA CHAVETA

3.5.1 MATERIAL SELECCIONADO

- Se selecciona un material propio de chavetas disponible en el mercado y con las dimensiones estándar.
- Acero AISI 1018 estirado en frío con las siguientes propiedades:

Tabla 9

Propiedades Mecánicas del Acero AISI 1018.

Propiedad	Sistema SI
Resistencia a la tensión	370MPa
Límite de rotura	440MPa
Módulo de elasticidad a 20° C	200GPa
Densidad	7800kg/m ³

Fuente: [Bohman, 2016].

3.5.2 DISEÑO GEOMÉTRICO

La chaveta será el elemento de bloqueo entre el anillo y la probeta de bronce. Evita el giro de estos elementos. La longitud de la chaveta debe ser del largo de la probeta de bronce para que este se deslice y se pueda modificar la fuerza de aplastamiento.

- La sección de la chaveta es de 3/8 in, dimensión estándar.
- La longitud es la necesaria para que la probeta de bronce se deslice.
- En el diseño mecánico se establece el factor de seguridad de la misma.

3.5.3 DISEÑO MECÁNICO

En el diseño de la probeta de acero se determinó el torque máximo en la Ecuación 3.1 y con el diámetro de la probeta de bronce de 74 mm se puede calcular la fuerza tangencial de la siguiente manera. Ver Figura 34.

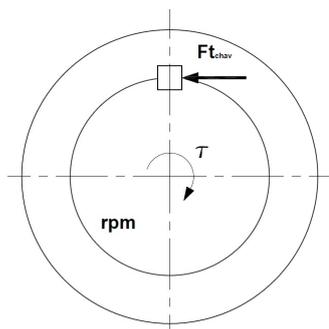


Figura 34: Fuerza Cortante.

$$\begin{aligned}
 Ft_{chav} &= \frac{T_{max}}{\frac{d_b}{2}} \\
 Ft_{chav} &= \frac{540.26 \text{ [Nm]} \cdot 1000 \text{ [mm]}}{37 \text{ [mm]} \cdot 1 \text{ [m]}} \\
 Ft_{chav} &= 14600 \text{ [N]}
 \end{aligned}
 \tag{3.40}$$

El esfuerzo producido es un cortante como se muestra en la Figura 35 siendo directamente proporcional a la fuerza Ft dado en la Ecuación 3.40 y resistida mediante el área de cortante. El cálculo queda de la siguiente manera.

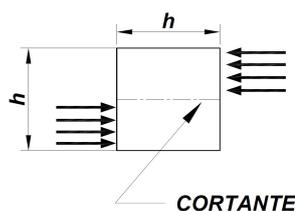


Figura 35: Esfuerzo Cortante Presente en la Chaveta.

$$\sigma_A = \frac{Ft_{chav}}{\frac{h}{2}L} \quad (3.41)$$

Mediante la resistencia del material a la fluencia se puede determinar la resistencia al cortante [Budynas et al., 2008] de la siguiente manera:

$$\begin{aligned} S_{sy} &= 0.577(S_y) \\ S_{sy} &= 0.577(440 \text{ [MPa]}) \\ S_{sy} &= 253.8 \text{ [MPa]} \end{aligned} \quad (3.42)$$

La chaveta estará sometida al factor de reducción de resistencia por temperatura de 0.672, ver Tabla 5 porque la temperatura máxima alcanzada es de 600 °C así la resistencia al cortante también se modificará:

$$S_{sy_{real}} = 253.8 \text{ [MPa]} * 0.549 = 139.138 \text{ [MPa]} \quad (3.43)$$

σ_A es igual a la resistencia al cortante del material dividido para un factor de seguridad. De esta manera igualando con la Ecuación 3.41 y se despeja el factor de seguridad que denominaremos FS_{chav} se determinará la funcionalidad del mismo mediante su cálculo:

$$\sigma_A = \frac{S_{sy_{real}}}{FS_{chav}} = \frac{Ft_{chav}}{\frac{h}{2}L} \quad (3.44)$$

$$FS_{chav} = \frac{S_{sy_{real}}(h)(L)}{2Ft} \quad (3.45)$$

Se reemplaza un valor estándar de 3/4 in de la cara del cuadrado de la chaveta en su sección transversal en la Ecuación 3.43, el cálculo queda de la siguiente manera:

$$FS_{chav} = \frac{139.38 \text{ [MPa]}(3/4 \text{ [in]})(50 \text{ [mm]}) \frac{24.5 \text{ [mm]}}{1 \text{ [in]}}}{(2)(14600 \text{ [N]})} = 4.5 \quad (3.46)$$

Note que en la Ecuación 3.46 el valor de seguridad es de 4.5 y este valor es dema-

siado alto ya que si el sistema llega a fallar lo más indicado es que se dañe la chaveta y así precautelar las partes del torno y sus accesorios. De igual manera es recomendable que primero falle la chaveta antes que las probetas. Por este motivo se prueba con un valor de sección de la chaveta de 3/8 in.

$$FS_{chav} = \frac{139.38 \text{ [MPa]}(3/8 \text{ [in]})(50 \text{ [mm]}) \frac{24.5 \text{ [mm]}}{1 \text{ [in]}}}{(2)(14600 \text{ [N]})} = 2.2 \quad (3.47)$$

De esta manera queda determinada las dimensiones de la chaveta, cabe mencionar que la longitud involucrada en la resistencia de la misma es de 50 mm. Esta distancia es el ancho del anillo, sin embargo la longitud de la chaveta es de 185mm necesaria para que la probeta de bronce deslice y pueda ajustar con la probeta de acero y generar calor.

3.6 DETERMINACIÓN DEL FACTOR DE SEGURIDAD DE LOS PINES DE LA LUNETETA.

Los tres pines de la luneta ingresan en tres agujeros en el anillo, separados entre si 120°. El torque máximo es transmitido a estos generando una fuerza tangencial. Por tanto, la fuerza tangencial que soporta cada pin es la fuerza total dividida entre tres.

Estas fuerzas tangenciales general un esfuerzo cortante, de esta manera se toma la Ecuación 3.44 y reemplaza el área $h * l$ por el área transversal de la sección del pin cuyo diámetro es 20 la Ecuación es la siguiente:

$$FS_{pin} = \frac{S_{su\ pin}(A_{pin})}{2F_{t\ anillo}} \quad (3.48)$$

La fuerza tangencial se calcula a partir del torque máximo y el radio del anillo. El diámetro del anillo es 110 mm. En el denominador aparece el número tres el cual significa que la fuerza total se divide en este valor porque la luneta tiene 3 pines.

$$\begin{aligned} F_{t\ anillo} &= \frac{T_{max}}{3 \frac{de_{anillo}}{2}} \\ F_{t\ anillo} &= \frac{540.262 \text{ [Nm]}}{3 * \frac{110 \text{ [mm]}}{2} \frac{1 \text{ [m]}}{1000 \text{ [mm]}}} \\ F_{t\ anillo} &= 3274 \text{ [N]} \end{aligned} \quad (3.49)$$

Según las especificaciones técnicas (ver Anexo C). La resistencia última a la tensión del material (Bronce estaño SAE 640) del que están fabricados los pines es de

$28\text{kgf/mm}^2 = 274.6 \text{ [MPa]}$, por tanto la resistencia al cortante del bronce es:

$$\begin{aligned} Ssu_{pin} &= 0.9Sut_{bronce} \\ Ssu_{pin} &= 0.9(274.6 \text{ [MPa]}) \\ Ssu_{pin} &= 247.13 \text{ [MPa]} \end{aligned} \quad (3.50)$$

El diámetro del pin es de 20 mm por tanto su área transversal es de:

$$A_{pin} = \frac{\pi}{4}d_{pin}^2 = \frac{\pi}{4}(15^2) = 0.1767 \text{ [m}^2\text{]} \quad (3.51)$$

Con los valores de las Ecuaciones 3.49, 3.50 y 3.51 reemplazados en la Ecuación 3.48 se calcula el factor de seguridad de los pines de la siguiente manera:

$$FS_{pin} = \frac{247.13 \text{ [MPa]}(0.1767 \text{ [m}^2\text{]})}{2(3274 \text{ [N]})} \frac{10^6 \text{ [Pa]} 1 \text{ [N/m}^2\text{]}}{1 \text{ [MPa]} 1 \text{ [Pa]}} = 6.67 \quad (3.52)$$

El valor detallado en la Ecuación 3.52 nos revela que los pines no fallarán. Si en el experimento se diera de forma imprevista algún fallo mecánico lo primero que fallará es la chaveta.

3.7 SELECCIÓN DE LA CELDA DE CARGA

La celda de carga medirá la fuerza que se genera al aplicar un par de torsión manual en el volante de inercia del contra punto del torno. Este se desplaza de manera axial a lo largo de la bancada y comprime la celda de carga, misma que está apoyada en el punto.

La celda de carga transmite esta fuerza axial a la probeta de bronce y se obtiene una fuerza controlada necesaria para el experimento. La celda de carga se escoge por las siguientes razones:

- El ambiente de operación es húmedo. Sin embargo, este está libre de polvo. Se escoge una celda IP65 que brinda estas condiciones.
- La capacidad máxima es de 5000 N. La fuerza máxima adquirida en experimentos anteriores fue de 250 kg. No se considera un sobre diseño porque las celdas de carga se dimensionan con una sobre carga de 150 %.
- El tipo de celda de carga es en forma de S ya que esta funciona con 4 galgas extensiométricas proporcionando estabilidad en las mediciones.

- La sensibilidad es de ± 0.02 [mV/V] con una salida de 5 a 12 DC o AC. Por lo que la celda necesita un amplificador de señal.

3.8 FORMA DE MONTAJE

La forma de montaje es una de las partes más críticas del experimento ya que la concentricidad de las piezas determinará el rozamiento de las caras evitando que se produzca fricción en líneas o en puntos y peor aún en las paredes cilíndricas de las probetas, por esta razón el montaje obedece un procedimiento que es el siguiente:

1. Las termocuplas para leer las temperaturas son instaladas en la probeta de bronce a través de abrazaderas de chapa de acero y ubicadas a 20 mm de distancia entre ellas. En la sección del anillo las termocuplas ingresan en los agujeros de diámetro 3 mm y son sujetadas por una platina.
2. Las temperaturas se conectan a un equipo PTC-T 1200 el cual se programó para guardar las temperaturas cada 5 minutos. El equipo guarda dichos valores en una tarjeta micro SD extraíble.
3. Ubicar el anillo en la probeta de bronce y verificar que este se deslice en la chaveta en la dirección axial.
4. A pesar de que la probeta de bronce estará estática en la luneta, esta se debe ubicar en el mandril del torno y ajustarla con el punto de manera que al girar y con un comparador de reloj regular las mordazas del mandril de manera que la lectura del reloj sea inferior a 0.1. Las mordazas se regulan con un martillo de goma.
5. Ubicar la luneta en la bancada del torno.
6. Ubicar los pines de la luneta en los agujeros del anillo, hacerlos topar sin modificar la regulación que proporcionó el comparador de reloj y bloquear los tornillos de los pines de la luneta de manera que queden fijos y en posición constante.
7. Aflojar el mandril del torno y desplazarlo hacia el punto. Sin desconectar el punto dejar el espacio necesario para que ingrese la probeta de acero al mandril.
8. Lubricar las probetas, de esta manera evitar el desgaste en arranque en frío.
9. Ubicar el comparador de reloj y regular las mordazas del mandril de manera que la lectura de cilindridad sea menor que 0.1.

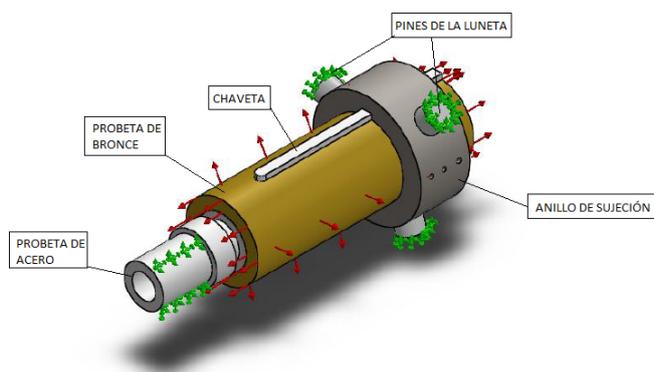
10. Aflojar el punto y ubicar la celda de carga entre el punto y la probeta de bronce. La celda de carga posee dos tornillo maquinados en forma de punto y forma de agujero hembra respectivamente.
11. Ubicar el punto en el tornillo hembra y ajustar el punto de acuerdo a la lectura de la celda de carga.
12. La celda de carga se conecta a un amplificador ADS 620 y este a su vez a una tarjeta de adquisición de datos Arduino uno, todos ellos se montan en un proto-board. Los datos son procesados en un programa de adquisición de datos, vistos y guardados en un computador portátil.
13. La temperatura del acero será medida a través de un láser cada 30 minutos con el termómetro láser IR.
14. La velocidad del viento es medida en un anemómetro digital. Por motivos de cálculo en la parte de diseño térmico se debe medir la velocidad del viento que produce el giro del mandril.
15. La velocidad de rotación del mandril se mide en un tacómetro en la parte posterior del torno cada 30 minutos en cada experimento.

3.9 SIMULACIÓN MECÁNICA

En las secciones anteriores se determinó los respectivos diseños de las probetas y los elementos del sistema que permitirá realizar los ensayos de fricción, en la presente simulación se detallará la forma de comportamiento de dichos elementos sometidos a cargas mecánicas con sus respectivos factores de seguridad y deformaciones.

3.9.1 SIMULACIÓN GENERAL DEL SISTEMA

En la Figura 36 cargada en modelo CAD están presentes los siguientes componentes: Probeta de acero, probeta de bronce, chaveta, anillo y pines de la luneta (3). El Esquema de las partes con sus respectivos nombres se puede verificar en el Anexo B, plano de conjunto.



Nombre del modelo: DISEÑO DEL ENSAMBLE DEL EXPERIMENTO DE FRICCIÓN
Configuración actual: Predeterminado

Figura 36: Simulación del Ensamble Completo.

Se carga la información del modelo para cada componente:

Tabla 10
Información del Ensamble.

Sólidos			
Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas	Ruta al documento/Fecha de modificación
 Cortar-Extruir1	Sólido	Masa:1.96043 kg Volumen:0.000249101 m ³ Densidad:7870 kg/m ³ Peso:19.2122 N	D:\compu 2016\TESIS NUNEZ - PAREDES1\PROBET OLID\ANILLO.SLDP Feb 25 13:48:45 2016
 Redondeo1	Sólido	Masa:0.131288 kg Volumen:1.6682e-005 m ³ Densidad:7870 kg/m ³ Peso:1.28662 N	D:\compu 2016\TESIS NUNEZ - PAREDES1\PROBETS OLID\CHAVETA.SLD PRT Feb 25 10:25:23 2016
 Saliente-Extruir2	Sólido	Masa:0.0763082 kg Volumen:8.69114e-006 m ³ Densidad:8780 kg/m ³ Peso:0.74782 N	D:\compu 2016\TESIS NUNEZ - PAREDES1\PROBET AS SOLID\PIN.SLDPRT Feb 25 11:45:58 2016
 Saliente-Extruir2	Sólido	Masa:0.0763082 kg Volumen:8.69114e-006 m ³ Densidad:8780 kg/m ³ Peso:0.74782 N	D:\compu 2016\TESIS NUNEZ - PAREDES1\PROBET AS SOLID\PIN.SLDPRT Feb 25 11:45:58 2016
 Saliente-Extruir2	Sólido	Masa:0.0763082 kg Volumen:8.69114e-006 m ³ Densidad:8780 kg/m ³ Peso:0.74782 N	D:\compu 2016\TESIS NUNEZ - PAREDES1\PROBETS OLID\PIN.SLDPRT Feb 25 11:45:58 2016
 Cortar-Extruir2	Sólido	Masa:0.927519 kg Volumen:0.000118155 m ³ Densidad:7850 kg/m ³ Peso:9.08969 N	D:\compu 2016\TESIS NUNEZ - PAREDES1\PROBET AS SOLID\PROBETA DE ACERO DF2.SLDPRT Feb 25 12:54:06 2016
 Cortar-Extruir7	Sólido	Masa:7.60985 kg Volumen:0.000895277 m ³ Densidad:8500 kg/m ³ Peso:74.5766 N	D:\compu 2016\TESIS NUNEZ - PAREDES1\PROBET AS SOLID\PROBETA DE BRONCE.SLDPRT

En las propiedades del material se especifican las propiedades corregidas por el efecto de la temperatura ver Tabla 5, la simulación toma una temperatura base de 273°K. Sin embargo, el sistema en las condiciones más críticas estará trabajando a 580°C , como es de suponer las propiedades de los materiales a esta temperatura decrecen y para que la simulación de resultados adecuados dichas propiedades fueron cambiadas y ajustadas a la realidad del experimento.

Tabla 11

Propiedades de los Materiales en el Ensamble.

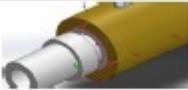
Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: AISI 1024 Acero laminado en frío Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Desconocido Límite elástico: 4.41e+008 N/m ² Límite de tracción: 4.62e+008 N/m ² Módulo elástico: 2.05e+011 N/m ² Coefficiente de Poisson: 0.29 Densidad: 7870 kg/m ³ Módulo cortante: 8e+010 N/m ² Coefficiente de dilatación térmica: 1.2e-005 /Kelvin	Sólido 1(Cortar-Extruir11)(ANILLO-2)
	Nombre: AISI 1018Acero estirado en caliente Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Esfuerzo de cizallamiento Límite elástico: 2.05e+008 N/m ² Límite de tracción: 2.4e+008 N/m ² Módulo elástico: 2.05e+011 N/m ² Coefficiente de Poisson: 0.29 Densidad: 7870 kg/m ³ Módulo cortante: 8e+010 N/m ² Coefficiente de dilatación térmica: 1.2e-005 /Kelvin	Sólido 1(Redondeo1)(CHAVETA-1)
	Nombre: Bronce fosfórico 10% D, UNS C52400 (2) Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Desconocido Límite elástico: 1.93e+008 N/m ² Límite de tracción: 4.45e+008 N/m ² Límite de compresión: 4.45e+008 N/m ² Módulo elástico: 1.1e+011 N/m ² Coefficiente de Poisson: 0.341 Densidad: 8780 kg/m ³ Módulo cortante: 4.1e+010 N/m ² Coefficiente de dilatación térmica: 1.8e-005 /Kelvin	Sólido 1(Saliente-Extruir2)(PIN-1), Sólido 1(Saliente-Extruir2)(PIN-2), Sólido 1(Saliente-Extruir2)(PIN-3)
	Nombre: DF2 Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Soderberg Límite elástico: 4.15e+008 N/m ² Límite de tracción: 4.3e+008 N/m ² Módulo elástico: 2.05e+011 N/m ² Coefficiente de Poisson: 0.285 Densidad: 7850 kg/m ³ Módulo cortante: 8e+010 N/m ²	Sólido 1(Cortar-Extruir2)(PROBETA DE ACERO DF2-1)
	Nombre: Latón Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Desconocido Límite elástico: 1.39689e+008 N/m ² Límite de tracción: 4.15e+008 N/m ² Módulo elástico: 1e+011 N/m ² Coefficiente de Poisson: 0.33 Densidad: 8500 kg/m ³ Módulo cortante: 3.7e+010 N/m ² Coefficiente de dilatación térmica: 1.8e-005 /Kelvin	Sólido 1(Cortar-Extruir7)(PROBETA DE BRONCE-1)

Se procede a definir las cargas y sujeciones, en la Tabla 12 Cargas y Sujeciones se puede observar que la energía que proporciona el torno es absorbida por los pines de la luneta. En esta simulación se tomó la condición en el que el sistema puede llegar a pararse por tanto todo el torque proveniente del mandril del torno se transmitirá de la probeta de acero al bronce y este a se vez a la chaveta y demás componentes, de esta manera se está simulando en las condiciones más críticas. El torque está ubicado en la probeta de acero ya que este es el elemento de transmisión del par de torsión. La probeta de acero se fija al mandril del torno ya que es ahí donde existe un contacto torno-sistema.

El torque máximo es de 542.262. Nm valor establecido a partir de la potencia del torno y con la mínima velocidad de giro del mandril. La fuerza axial que se ejerce es la máxima medida en la celda de carga con un valor de 5000 N. Las fuerzas axiales que se generan por la dilatación del material es de 60000 N, Ver sección donde se diseña la probeta de acero.

Tabla 12

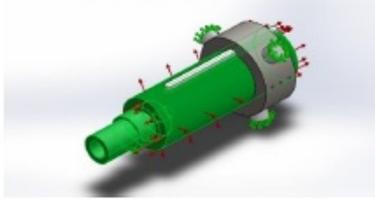
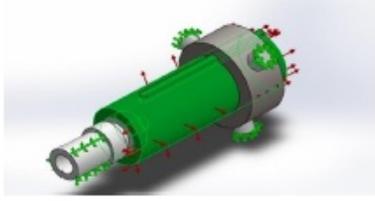
Cargas y Sujeciones del Ensamble.

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción			
Fijo-2		Entidades: 3 cara(s) Tipo: Geometría fija			
Fuerzas resultantes					
Componentes	X	Y	Z	Resultante	
Fuerza de reacción(N)	-2872.34	66874.8	69.3972	66936.5	
Momento de reacción(N·m)	0	0	0	0	
Fijo-4		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Geometría fija			
Fuerzas resultantes					
Componentes	X	Y	Z	Resultante	
Fuerza de reacción(N)	732.084	36367.9	-53156.8	64411.2	
Momento de reacción(N·m)	0	0	0	0	
Fijo-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Geometría fija			
Fuerzas resultantes					
Componentes	X	Y	Z	Resultante	
Fuerza de reacción(N)	2147.92	28141.4	45990.1	53959.6	
Momento de reacción(N·m)	0	0	0	0	
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga			
Fuerza-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal Valor: 5000 N			
Presión-2		Entidades: 7 cara(s) Tipo: Normal a cara seleccionada Valor: -75 Unidades: N/mm ² (MPa)			
Torsión-1		Entidades: 1 cara(s) Referencia: Cara< 1 > Tipo: Aplicar momento torsor Valor: 540.3 N·m			

En la Tabla 13, Información de Contacto, están presentes todas las relaciones de contacto, así por ejemplo el acero está en contacto con el bronce, la chaveta con el anillo, el mismo anillo con los pines. Esta información es necesaria ya que al simular se transmitirán las fuerzas mecánicas de manera adecuada.

Tabla 13

Información de Contacto.

Contacto	Imagen del contacto	Propiedades del contacto
Contacto entre componentes-1		Tipo: Unión rígida Componentes: 2 Sólido(s) Opciones: Mallado compatible
Contacto entre componentes-2		Tipo: Unión rígida Componentes: 1 componente(s), 1 Sólido(s) Opciones: Mallado incompatible
Contacto entre componentes-3		Tipo: GAP nodo-a-nodo Componentes: 4 Sólido(s)
Contacto entre componentes-4		Tipo: GAP nodo-a-nodo Componentes: 2 Sólido(s)
Contacto entre componentes-5		Tipo: GAP nodo-a-nodo Componentes: 2 Sólido(s) Valor de fricción: 0.05

La malla utilizada es fina para obtener resultados de precisión.

Tabla 14

Información de Malla.

Tipo de malla	Malla sólida
Mallador utilizado:	Malla basada en curvatura
Puntos jacobianos	4 Puntos
Tamaño máximo de elemento	0 mm
Tamaño mínimo del elemento	0 mm
Calidad de malla	Elementos cuadráticos de alto orden
Regenerar la malla de piezas fallidas con malla incompatible	Desactivar
Número total de nodos	18960
Número total de elementos	11527
Cociente máximo de aspecto	11.607
% de elementos cuyo cociente de aspecto es < 3	93.7
% de elementos cuyo cociente de aspecto es > 10	0.026
% de elementos distorsionados (Jacobiana)	0
Tiempo para completar la malla (hh:mm:ss):	00:00:02
Nombre de computadora:	PERSONAL

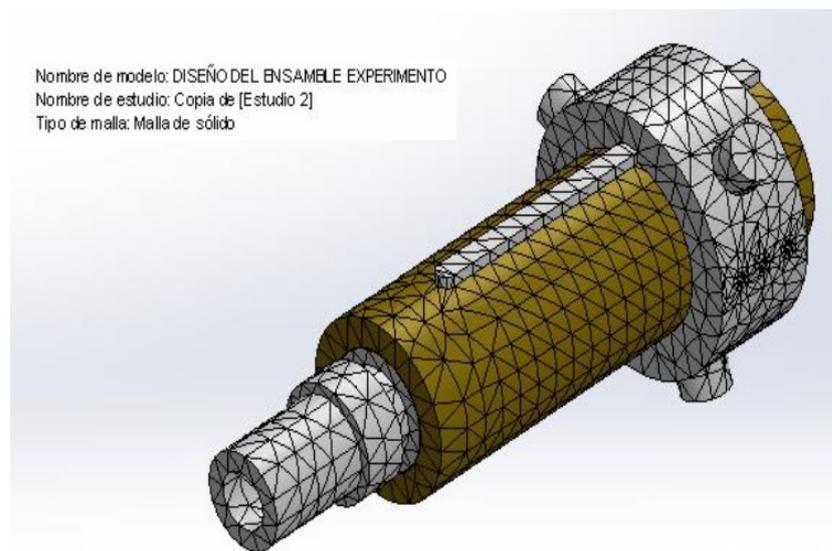


Figura 37: Información de Malla.

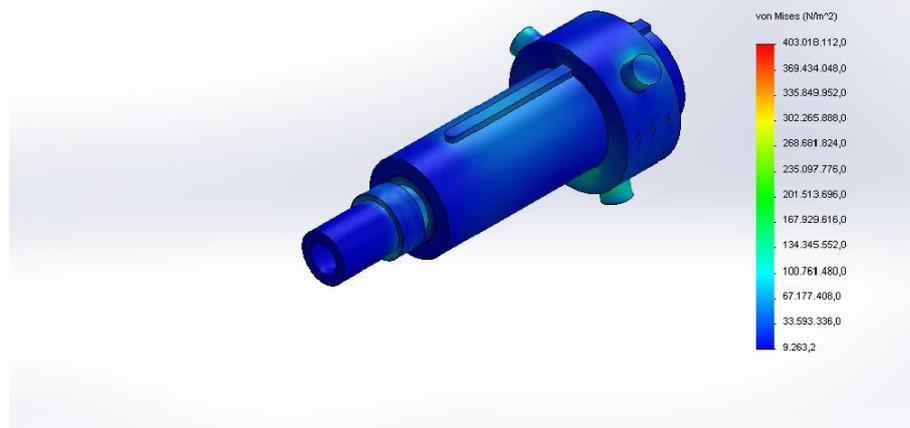
De la misma manera que en los cálculos de diseño de las probetas la simulación calcula el esfuerzo combinado de Von Mises, se puede observar que las partes más afectadas son los pines de la luneta y la sección menor de la probeta de acero con un esfuerzo combinado de 115 a 120 MPa, el cual tiene similitud con los esfuerzo especificados en el diseño de la probeta de acero.

Tabla 15

Esfuerzos Combinados.

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Tensiones1	VON: Tensión de von Mises	9263.17 N/m ² Nodo: 8341	4.03018e+008 N/m ² Nodo: 6649

Nombre de modelo: DISEÑO DEL ENSAMBLE EXPERIMENTO
Nombre de estudio: Copia de [Estudio 2]
Tipo de resultado: Análisis estático tensión nodal Tensiones1



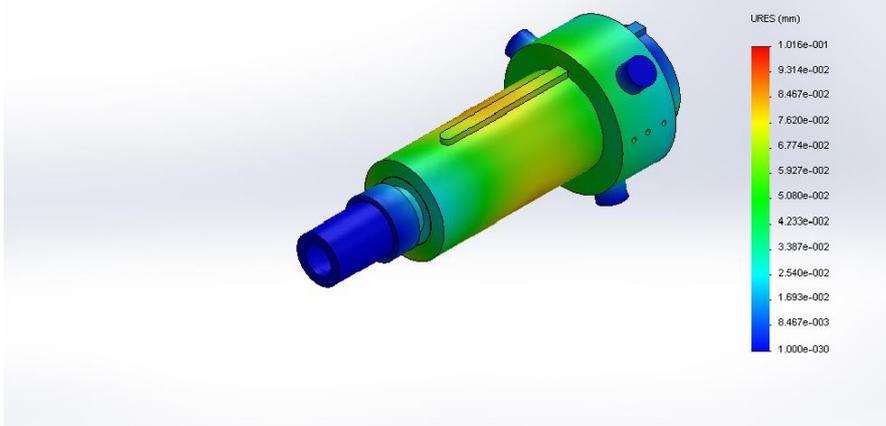
DISEÑO DEL ENSAMBLE EXPERIMENTO-Copia de [Estudio 2]-Tensiones-Tensiones1

Tabla 16

Desplazamientos del Ensamble.

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Desplazamientos1	URES: Desplazamiento resultante	0 mm Nodo: 6462	0.101603 mm Nodo: 18185

Nombre de modelo: DISEÑO DEL ENSAMBLE EXPERIMENTO
Nombre de estudio: Copia de [Estudio 2]
Tipo de resultado: Desplazamiento estático Desplazamientos1

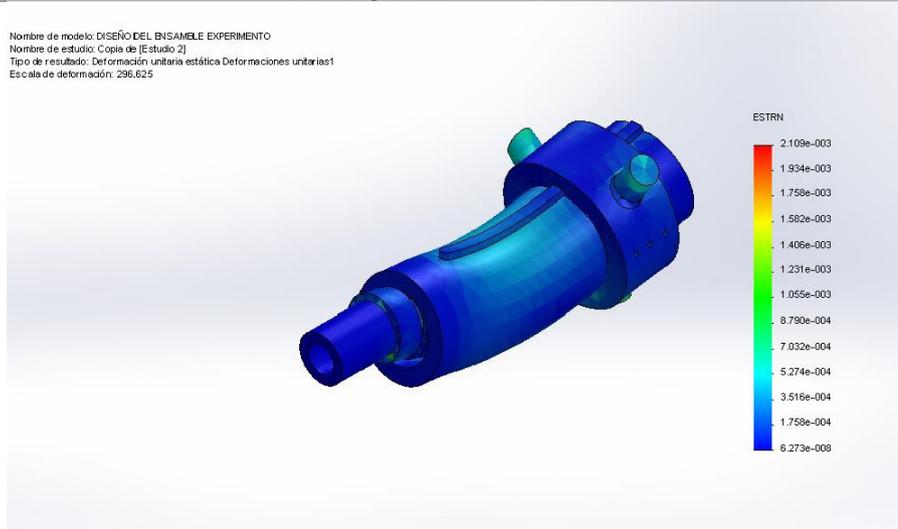


DISEÑO DEL ENSAMBLE EXPERIMENTO-Copia de [Estudio 2]-Desplazamientos-Desplazamientos1

Tabla 17

Deformaciones Unitarias.

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Deformaciones unitarias1	ESTRN: Deformación unitaria equivalente	6.27258e-008 Elemento: 4693	0.0021095 Elemento: 6978



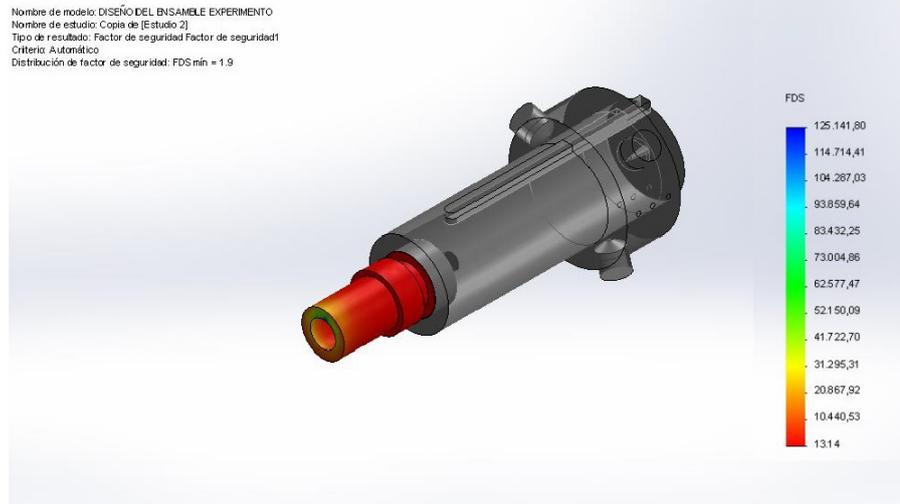
DISEÑO DEL ENSAMBLE EXPERIMENTO-Copia de [Estudio 2]-Deformaciones unitarias-
Deformaciones unitarias1

La seguridad del acero bajo estas condiciones es de 13 y en los cálculos se estableció un valor de 1.9. Sin embargo, el valor de la simulación es a partir de un cálculo estático y el valor de 1.9 es un cálculo a fatiga. Es de mencionar que la probeta de acero en subsecciones siguientes se simulará a fatiga ya que por efectos de rotación del mandril esta probeta estará a carga y descarga. De la misma forma esta simulación toma como que el sistema pueda llegar a pararse como un parámetro muy crítico. Sin embargo, la probeta de acero está sometida a la reacción que provoque en bronce al friccionarlo, en otras palabras el acero estará sometido a esfuerzos producidos por la fuerza de fricción que produzca el rozamiento entre el bronce y el acero, así el elemento que en un caso crítico llegue a fracturarse será la chaveta.

Tabla 18

Factor de Seguridad de la Probeta de Acero.

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Factor de seguridad1	Automático	1.911	44801.1
		Nodo: 8103	Nodo: 8341

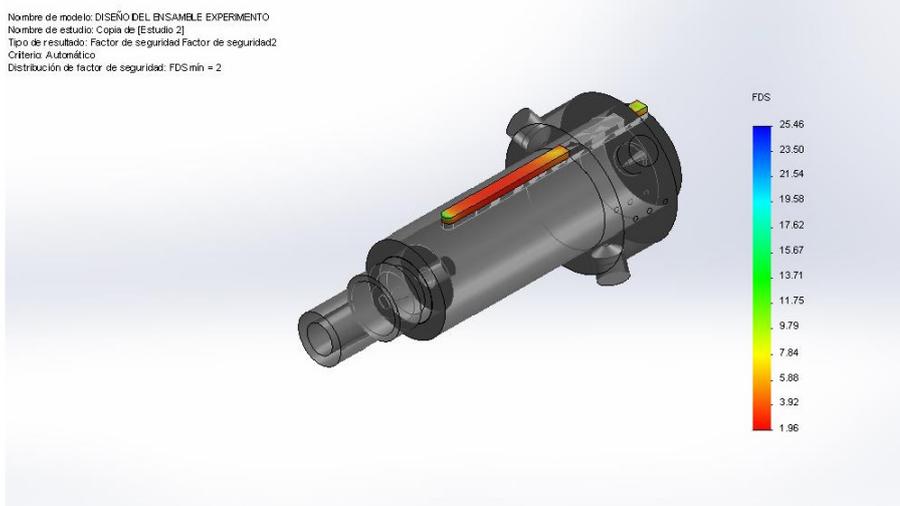


DISEÑO DEL ENSAMBLE EXPERIMENTO-Copia de [Estudio 2]-Factor de seguridad-Factor de seguridad1

Tabla 19

Factor de Seguridad de la Chaveta.

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Factor de seguridad2	Automático	1.96159	25.4566
		Nodo: 6206	Nodo: 6215



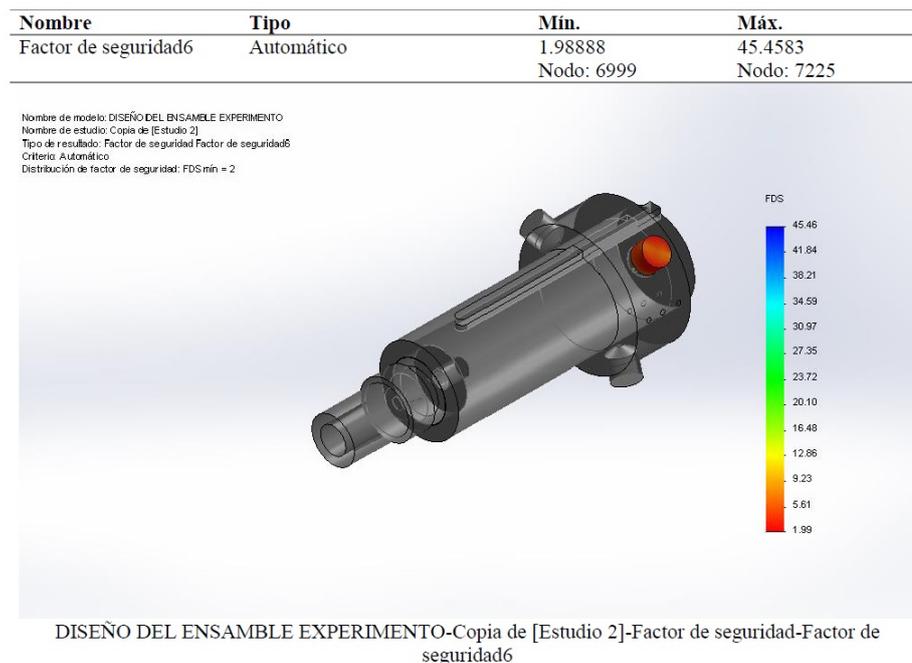
DISEÑO DEL ENSAMBLE EXPERIMENTO-Copia de [Estudio 2]-Factor de seguridad-Factor de seguridad2

En los cálculos de la determinación del factor de seguridad de los pines de la luneta se estableció un factor de 6 y en la simulación se tiene un factor de 2 y es porque en los

cálculos analíticos se tomó la fuerza cortante dividida entre tres ya que se considera que los tres pines de la luneta soportan esta fuerza de manera uniforme. Por otro lado, en la simulación el software analiza el primer pin que se bloquea al existir movimiento inminente.

Tabla 20

Factor de Seguridad de los Pines.



3.9.2 SIMULACIÓN A FATIGA DE LA PROBETA DE ACERO

En la subsección anterior se establecieron las deformaciones generales del sistema y las zonas críticas. Una de estas zonas es la sección menor del acero y por la naturaleza de la carga de torsión este debe ser analizado bajo efecto de cargas cíclicas. En la Tabla 21, Propiedades de Estudio del Acero, se puede visualizar el factor de reducción de resistencia a la fatiga que resulta de la multiplicación del factor de reducción por efecto de temperatura con un valor de 0.549 y por efecto de acabado superficial de 0.583. No se toman en cuenta el resto de factores porque el programa de simulación detecta el tamaño, la carga y de la misma manera los concentradores de esfuerzo.

Tabla 21

Propiedades de Estudio de la Probeta de Acero.

Nombre de estudio	Estudio 1
Tipo de análisis	Fatiga(Amplitud constante)
Interacción entre sucesos	Sin interacción
Calcular tensiones alternas usando	Tensión equivalente (von Mises)
Cara de elemento SHELL	Cara superior
Corrección de la tensión media	Soderberg
Factor de reducción de resistencia a la fatiga	0.32
Vida infinita	1e+011 Ciclos
Carpeta de resultados	Documento de SolidWorks (TESIS NUÑEZ - PAREDES1\PROBETAS)

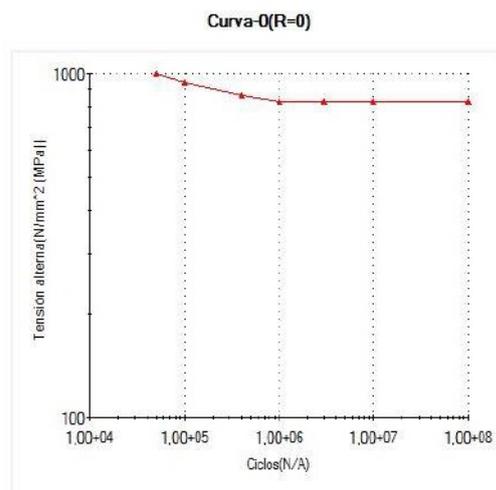
En la Tabla 22 Propiedades del Acero. Se encuentra la curva para vida infinita del mismo.

Tabla 22

Propiedades del Acero.

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: DF2 (2) Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión máxima de von Mises	Sólido 1(Cortar-Extruir2)(PROBETA DE ACERO DF2)

Datos de curva:



0.0

Curva-0(R=0)

El factor de seguridad es de 1.922 lo que está de acuerdo a los cálculos ya establecidos.

Tabla 23

Factor de Seguridad de la Probeta de Acero Sometido a Fatiga.



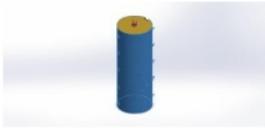
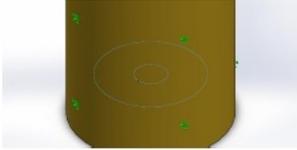
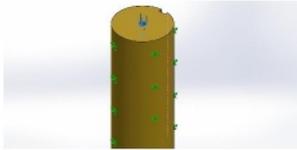
3.9.3 SIMULACIÓN A COMPRESIÓN DE LA PROBETA DE BRONCE.

El bronce estará sometido a un esfuerzo de compresión de dos fuerzas ya establecidas, una es la carga máxima de la celda y otra es la fuerza axial que se produce por efectos de dilatación mecánica. Los valores son 5000 N y 60000 N respectivamente.

Las sujeciones se establecen a lo largo de la probeta para que esta se dilate axialmente y se deforme los agujeros internos en donde se produce la fricción.

Tabla 24

Cargas y Sujeciones de la Probeta de Bronce.

Nombre de sujeción	Imagen de sujeción	Detalles de sujeción		
Fijo-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Geometría fija		
Fuerzas resultantes				
Componentes	X	Y	Z	Resultante
Fuerza de reacción(N)	0.548981	196.647	0.250435	196.647
Momento de reacción(N·m)	0	0	0	0
Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga		
Fuerza-1		Entidades: 1 cara(s) Tipo: Aplicar fuerza normal 65000 N Valor:		
Fuerza-2		Entidades: 1 cara(s) Referencia: Arista< 1 > Aplicar fuerza Tipo: Valores: -65000 N		

El esfuerzo combinado de Von Mises es superior al límite de fluencia del material por lo que este se deforma en el agujero donde se ajusta el contra punto y en el agujero de fricción.

Tabla 25

Esfuerzo Combinado de Von Mises para la Probeta de Bronce.

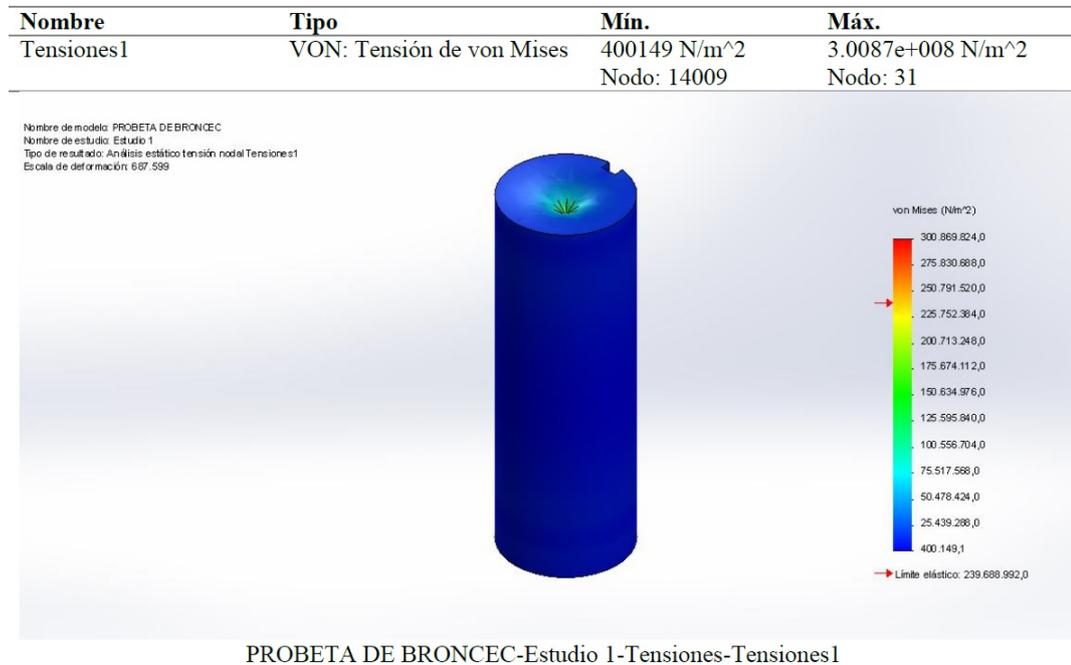


Tabla 26

Desplazamientos de la Probeta de Bronce.

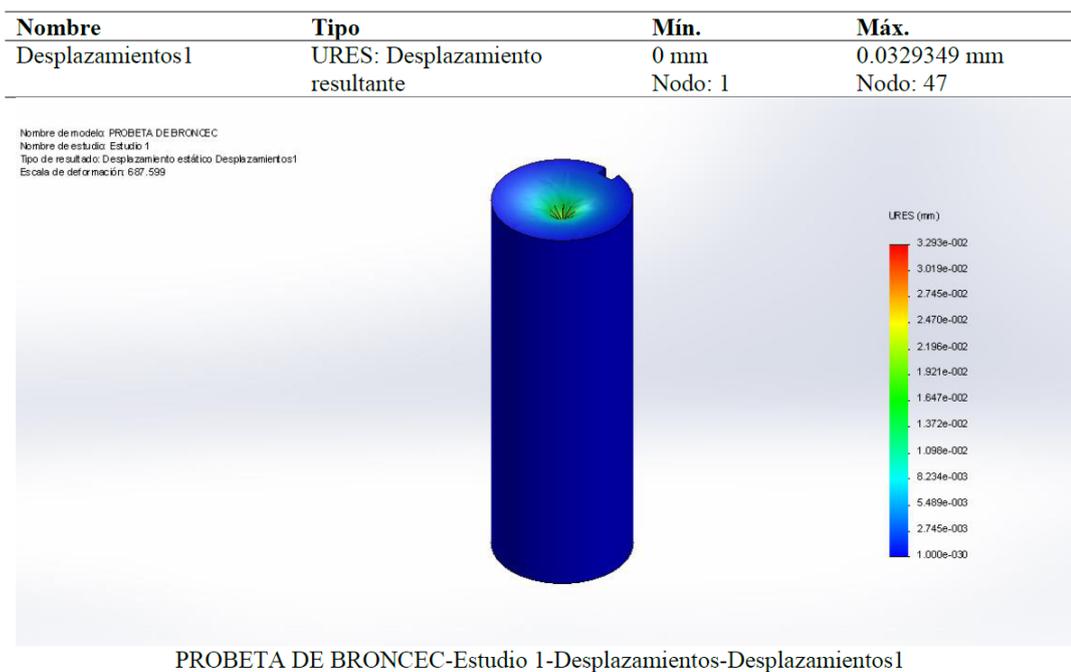
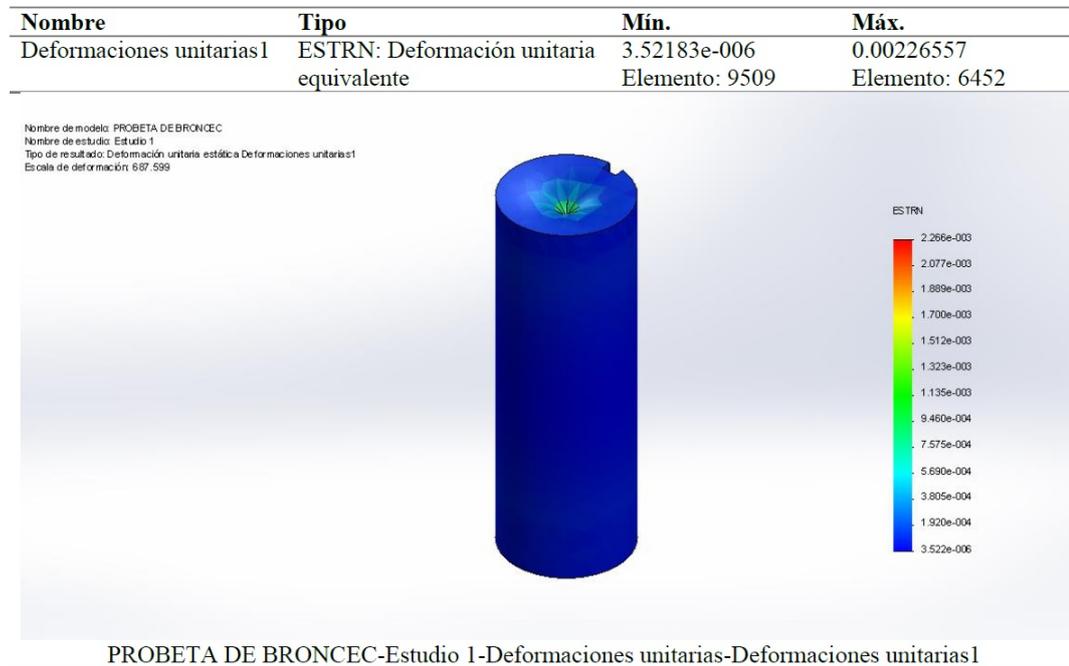


Tabla 27

Deformación Unitaria Equivalente de la Probeta de Bronce.



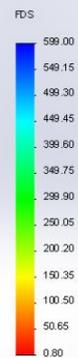
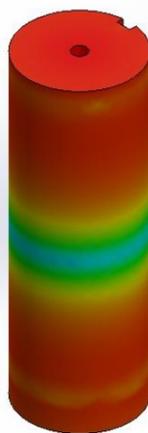
De la misma forma al sobrepasar el límite de fluencia del material el factor es menor que 1 y es de 0.8. Por esta razón en la probeta de bronce el límite máximo de temperatura debe ser de 400°C.

Tabla 28

Factor de Seguridad de la Probeta de Bronce.

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Factor de seguridad1	Automático	0.796653 Nodo: 31	598.999 Nodo: 14009

Nombre de modelo: PROBETA DE BRONCEC
Nombre de estudio: Estudio 1
Tipo de resultado: Factor de seguridad Factor de seguridad1
Origen: Automático
Distribución de factor de seguridad: FDS mín = 0.8



PROBETA DE BRONCEC-Estudio 1-Factor de seguridad-Factor de seguridad1

CAPÍTULO 4

ANÁLISIS TÉRMICO DEL SISTEMA DE FRICCIÓN

4.1 PARÁMETROS GENERALES TÉRMICOS DEL EXPERIMENTO

Las probetas de acero y bronce generarán calor mediante la fricción de sus caras, como la sección anterior lo indica, por lo que las temperaturas en el bronce se medirán mediante 9 termocuplas instaladas a 15mm y 20 mm desde el inicio de la cara frontal. Figura 41, la temperatura ambiente se medirá mediante una termocupla extra colocada en la posición 10 del registrador de temperatura PCE-T 1200 de doce canales el cual nos permite registrar datos de temperatura cada 5 minutos.

Los datos adquiridos se enviarán a una hoja de Excel para su posterior análisis. Para la medición de las temperaturas en la probeta acero ya que es un elemento rotatorio, se medirá mediante un termómetro láser de alta temperatura IR el cual nos da la temperatura de la probeta de acero, los valores medidos se redactan en una hoja de Excel para su análisis.

El valor de la velocidad del viento en cada experimento se medirá mediante un anemómetro digital CFM de EXTECH, se medirá a una distancia de 15cm del mandril del torno con dirección perpendicular a la probeta de bronce, en cada experimento se realizará la medición.



Figura 38: Registrador de Temperatura PCE-T 1200.



Figura 39: Anemómetro Digital CFM de EXTECH.



Figura 40: Termómetro Láser IR.

Como es un problema de diseño térmico se necesitan las propiedades térmicas del Acero: ARNE-DF2 y del Bronce UNS C38500, estas propiedades son el coeficiente de expansión térmica lineal, la capacidad calorífica y el coeficiente de conducción térmica. Para lo cual se hará referencia a las siguientes tablas.

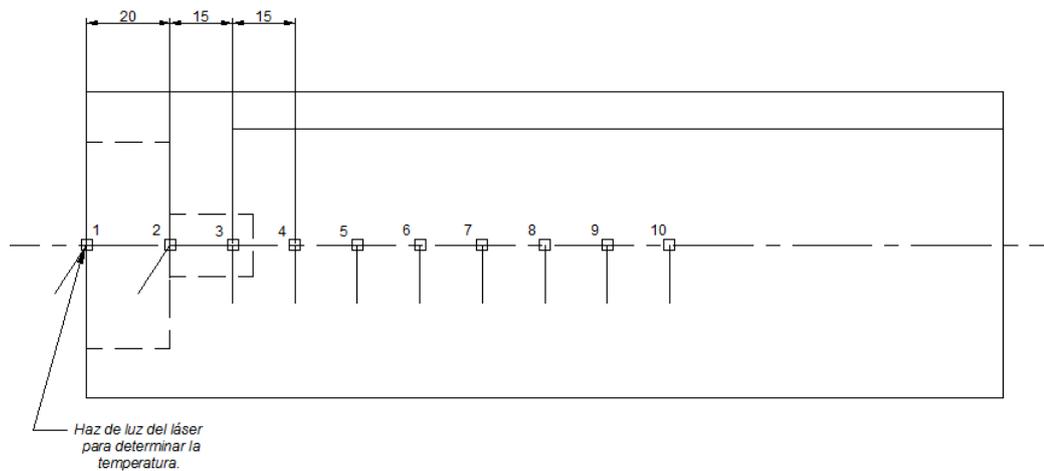


Figura 41: Distribución de las Termocuplas en la Probeta de Bronce.

Propiedades Térmicas del Acero.

Las propiedades que se describen a continuación pertenecen al Acero ARNE-DF2 y estos valores de utilizarán para realizar el análisis matemático y experimental.

Tabla 29

Propiedades Térmicas del Acero DF2.

Propiedad	Sistema SI	Temperatura
CET Lineal	$11.7\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$	$20^{\circ}\text{C} - 200^{\circ}\text{C}$
CET Lineal	$11.4\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$	400°C
Calor Específico	$460\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$	–
Conductividad Térmica	$32\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$	20°C
Punto de Fusión	1538°C	–
Densidad	$7800\text{kg}/\text{m}^3$	20°C
Densidad	$7700\text{kg}/\text{m}^3$	400°C

Fuente: [Uddeholm, 2002].

Propiedades Térmicas del Bronce

Las propiedades que se describen a continuación pertenecen al Bronce Dulce UNS C38500 y estos valores de utilizarán para realizar el análisis matemático y experimental.

Tabla 30

Propiedades Térmicas del Bronce Dulce UNS C38500.

Propiedad	Sistema SI	Temperatura
CET Lineal	$20.9\mu\text{m}/\text{m}\cdot^{\circ}\text{C}$	$20^{\circ}\text{C} - 300^{\circ}\text{C}$
Calor Específico	$380\text{J}/\text{kg}\cdot\text{K}$	–
Conductividad Térmica	$123\text{W}/\text{m}\cdot\text{K}$	20°C
Punto de Fusión	$875^{\circ}\text{C} - 890^{\circ}\text{C}$	–
Densidad	$8470\text{kg}/\text{m}^3$	25°C

Fuente: [Davis et al., 2001].

4.2 DISEÑO TÉRMICO

4.2.1 DETERMINACIÓN DEL CALOR GENERADO POR FRICCIÓN

Para determinar el calor producido por el par de fricción bronce-acero se necesita determinar el área de contacto así como la presión de aplastamiento, que es igual a:

$$\begin{aligned}
 P^{\circ} &= \frac{F_a}{A_c} \\
 P^{\circ} &= \frac{200.63\text{kg} \cdot 9,8\text{m/s}^2}{\pi(R_o^2 - R_i^2)} \\
 P^{\circ} &= \frac{1966\text{N}}{1.71 \times 10^{-3}\text{m}^2} \\
 P^{\circ} &= 1,15 \times 10^6\text{Pa}, \tag{4.1}
 \end{aligned}$$

donde.

P° es la presión de aplastamiento

A_c es el área de contacto.

F_a es la fuerza de aplastamiento.

R_o es el radio de la probeta de acero igual a 24.5 mm.

R_i es el radio interno de la probeta de bronce igual a 7.5 mm.

Los datos son tomados de Capitulo 4, Sección 4.1, Experimento #4 para realizar el ejemplo de cálculos de este diseño.

La ecuación que nos permite calcular el calor producido por la fricción entre dos superficies tomando en cuenta parámetros de velocidad de rotación, presión de aplastamiento con aplicación en superficies cilíndricas es:

$$\begin{aligned}
 q_{Gf} &= \frac{2}{3}\omega P^{\circ}\pi [R_o^3 - R_i^3] \\
 q_{Gf} &= \frac{2}{3}(231\text{rpm}) \left(1.15 \times 10^6\text{Pa}\right) \pi \left[(24.5\text{mm})^3 - (7.5\text{mm})^3\right] \\
 q_{Gf} &= 832.59\text{W}, \tag{4.2}
 \end{aligned}$$

donde.

ω representa las revoluciones a las que gira el mandril equivalente a 231 rpm.

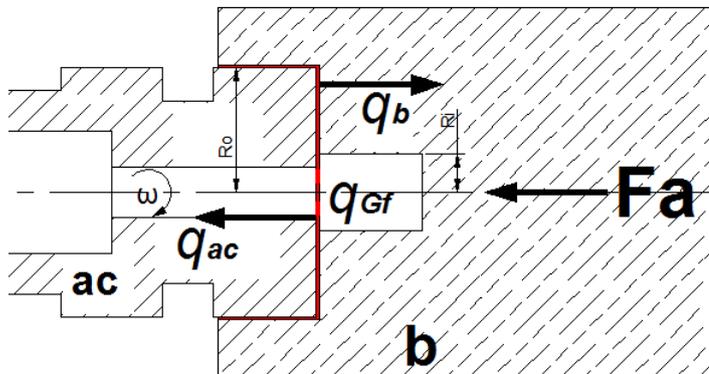


Figura 42: Calor Generado por Fricción.

4.2.2 DETERMINACIÓN DEL CALOR TRANSFERIDO AL BRONCE

Para determinar el calor transferido hacia el bronce se necesita calcular sus áreas tanto interna como superficial para los posteriores cálculos de convección y radiación así:

$$A_b = \frac{\pi(D_b)^2}{4} = 4.30 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (4.3)$$

$$A_{ob} = \pi D_b L_b = 0.04 \text{ m}^2, \quad (4.4)$$

donde.

A_b es el área interna.

A_{ob} es el área superficial.

$L_b = 220 \text{ mm} - 50 \text{ mm} = 170 \text{ mm}$ es la longitud de la probeta de bronce superficial.

$D_b = 74 \text{ mm}$ es el diámetro de la probeta de bronce.

4.2.2.1 COEFICIENTE DE CONVECCIÓN FORZADA FLUJO EXTERNO

Para el análisis de transferencia de calor por convección es necesario determinar el valor del coeficiente de convección con las condiciones de que la probeta de bronce se mantiene fija e inmóvil sujeta en la bancada del torno por lo que la velocidad del aire que rodea a la probeta se analiza esto mediante la Ecuación de Wattmuff que determina el coeficiente de convección forzada en un flujo externo, donde: $v_{aire} = 0.57 \text{ m/s}$. El coeficiente de transferencia de calor por convección inducida por el viento se calcula numéricamente.

Ecuación de Wattmuff:

$$\begin{aligned} h_{c,b-a} &= 2,8 + 3v_{aire} \\ h_{c,b-a} &= 4,51 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \end{aligned} \quad (4.5)$$

4.2.2.2 COEFICIENTE DE RADIACIÓN

El coeficiente de radiación se determina utilizando las condiciones de una temperatura media superficial, se mantiene una emisividad constante para el bronce, con la constante de Stefan-Boltzman que es igual a: $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$. La temperatura media superficial se calcula como la temperatura media entre el bronce $T_{s_b} = 452 \text{ K}$ y el ambiente $T_a = 302 \text{ K}$.

$$T_{m,b-a} = \frac{T_{s_b} + T_a}{2} = 377 \text{ K},$$

donde.

T_a es temperatura ambiente.

T_{s_b} es la temperatura superficial del bronce.

Para el cálculo del coeficiente de radiación es necesario indicar cual es la emisividad del bronce, para los cálculos se tomará como: $\epsilon_b = 0.55$ de la Tabla 1. El coeficiente de radiación se calcula con la siguiente formula:

$$\begin{aligned} h_{r,b-a} &= 4\epsilon_b\sigma T_{m,b-a}^3 \\ h_{r,b-a} &= 6.684 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \end{aligned} \quad (4.6)$$

4.2.2.3 BALANCE ENERGÉTICO PARA EL BRONCE

Una vez determinado los coeficiente de radiación y convección se realiza el balance energético del calor transferido a la probeta de bronce, con temperaturas de acumulación de calor T_{b1} y T_{b2} para un tiempo de 10 min. Para lo cual medimos la temperatura del bronce en el punto de más alta temperatura; las propiedades del bronce como la capacidad calorífica y la masa del bronce se determinan a continuación, donde los parámetros iniciales son:

$T_b = 452 \text{ K}$ es la temperatura más elevada en el bronce.

$T_a = 302 \text{ K}$ es la temperatura ambiente.

$M_b = 7.6774 \text{ kg}$ es la masa inicial del bronce.

$cp_b = 380 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ es la capacidad calorífica del bronce en el ambiente. Tabla 30.

$t_{calent} = 10 \text{ min}$ es el intervalo de tiempo.

$T_{b1} = 302.4 \text{ K}$ temperatura inicial.

$T_{b2} = 330.8 \text{ K}$ temperatura final después de t_{calent} .

Con estas condiciones iniciales medidas en el Experimento #4 se puede determinar los calores perdidos tanto de convección como de radiación así como el calor acumulado en el bronce y el calor perdido por conducción a través del anillo.

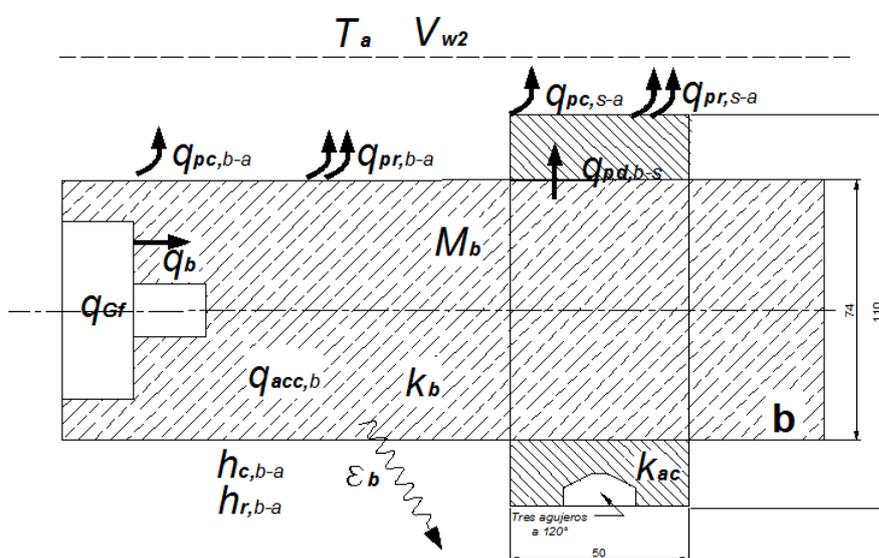


Figura 43: Balance Energético del Bronce.

- Calor perdido por convección es igual a:

$$q_{pc,b-a} = h_{c,b-a} A_{ob} (T_b - T_a) = 26.74 \text{ W}, \quad (4.7)$$

donde.

$h_{c,b-a}$ es el coeficiente de convección del bronce calculado en la Ecuación 4.5

A_{ob} es el área superficial.

- Calor perdido por radiación es igual a:

$$q_{pr,b-a} = h_{r,b-a} A_{ob} (T_b - T_a) = 39.62 \text{ W} \quad (4.8)$$

- Calor acumulado en el bronce igual a:

$$q_{acc,b} = \frac{M_b}{t_{calent}} c p_b (T_{b2} - T_{b1}) = 138.09 \text{ W} \quad (4.9)$$

- Calor perdido por conducción, convección y radiación en el anillo sujetador del bronce es igual:

$$q_{p_d,b-s} = q_{p_{cd},b-s} + q_{p_c,s-a} + q_{p_r,s-a},$$

donde.

$L_{anillo} = 0.050\text{m}$ es la longitud del anillo.

$k_{ac} = 51.9\text{W/mK}$ es la conductividad térmica del acero.

$T_{pi} = 441.6\text{K}$ es la temperatura inicial.

$T_{pf} = 433.1\text{K}$ es la temperatura final.

$r_2 = 0.055\text{m}$ el radio mayor del anillo.

$r_1 = 0.037\text{m}$ el radio menor de anillo.

Conducción

Calor perdido por conducción:

$$\begin{aligned} q_{p_{cd},b-s} &= -2\pi \cdot L_{anillo} \cdot k_{ac} \cdot \frac{(T_{pf} - T_{pi})}{\ln\left(\frac{r_2}{r_1}\right)} \\ q_{cd,b-s} &= -2\pi \cdot 0.05\text{m} \cdot 51.9\text{W/mK} \cdot \frac{(433.1\text{K} - 441.6\text{K})}{\ln\left(\frac{0.055\text{m}}{0.037\text{m}}\right)} \\ q_{p_{cd},b-s} &= 349.61\text{W} \end{aligned} \quad (4.10)$$

Convención:

El área de convención es igual a

$$A_{s,an} = 2 \left\{ \frac{\pi}{4} \left[(0.110\text{m})^2 - (0.074\text{m})^2 \right] \right\} + 2\pi r_2 L_{anillo} = 0.028\text{m}^2 \quad (4.11)$$

El coeficiente de convección se toma el mismo que el acero en la Ecuación 4.5.

$$h_{c,b-a} = 4.51 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

Calor perdido por convención:

$$\begin{aligned}
 q_{p_c,s-a} &= h_{c,b-a} \cdot A_{san} \cdot (T_{pf} - T_a) \\
 q_{p_c,s-a} &= 4.51 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 0.028\text{m}^2 \cdot (433.1\text{K} - 302\text{K}) \\
 q_{p_c,s-a} &= 16.37\text{W}
 \end{aligned} \tag{4.12}$$

Radiación:

La emisividad del anillo es igual a la del acero. Tabla 1. Este valor se enunció en secciones anteriores y es $\epsilon_{anillo} = 0.9$. La temperatura de película es:

$$T_{ms} = \frac{T_{pf} + T_a}{2} = 367.55\text{K}$$

El coeficiente de radiación es:

$$h_{r,b-s} = 4 \cdot \epsilon_{anillo} \cdot \sigma \cdot T_{ms}^3 = 10.14 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \tag{4.13}$$

$$\begin{aligned}
 q_{p_r,s-a} &= h_{r,b-s} \cdot A_{san} \cdot (T_{pf} - T_a) \\
 q_{p_r,s-a} &= 10.14 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \cdot 0.028\text{m}^2 \cdot (433.1\text{K} - 302\text{K}) \\
 q_{p_r,s-a} &= 36.78\text{W}
 \end{aligned} \tag{4.14}$$

$$q_{p_d,b-s} = q_{p_{cd},b-s} + q_{p_c,s-a} + q_{p_r,s-a} = 402.76\text{W} \tag{4.15}$$

4.2.2.4 CALOR TOTAL PERDIDO EN EL BRONCE

El calor total perdido en el bronce es la suma de los calores anteriormente resueltos en las Ecuaciones 4.7, 4.8, 4.9, 4.15, por lo que el calor total transferido al bronce es igual a:

$$q_b = q_{p_c,b-a} + q_{p_r,b-a} + q_{acc,b} + q_{p_d,b-s} = 607.21\text{W} \tag{4.16}$$

4.2.3 DETERMINACIÓN DEL CALOR TRANSFERIDO AL ACERO

Para determinar el calor transferido hacia el acero se necesita calcular sus áreas tanto interna como superficial para los posteriores cálculos de convención y radiación de la probeta de acero,

donde.

$L_{ac} = 100$ mm es la longitud de la probeta de acero.

$d_{ac} = 49$ mm es el diámetro de la probeta de acero.

$$A_{ac} = \frac{\pi(d_{ac})^2}{4} = 1.886 \times 10^{-3} \text{ m}^2 \quad (4.17)$$

$$A_{oac} = \pi d_{ac} L_{ac} = 0.015 \text{ m}^2 \quad (4.18)$$

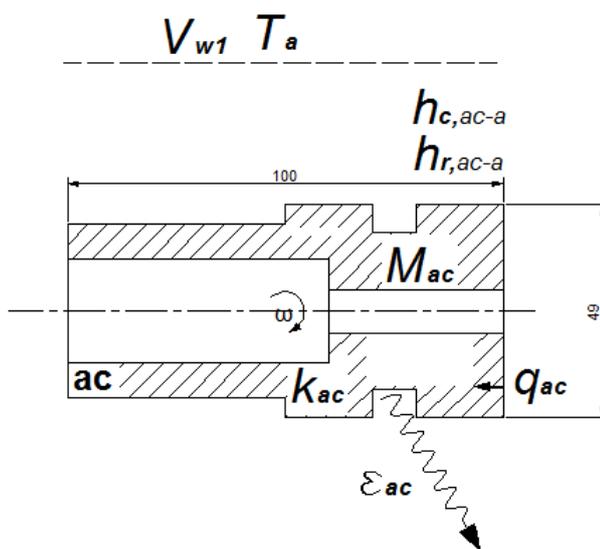


Figura 44: Parámetros Dimensionales y Térmicos del Acero.

4.2.3.1 ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR PARA EJES ROTATORIOS

Para determinar el calor perdido por convección en la probeta de acero es necesario determinar el coeficiente de convección utilizando la teoría de ejes rotatorios Ecuación 2.26, ya que el elemento de acero está sometido a un movimiento de rotación en el mandril del torno, para realizar el cálculo de este coeficiente se utiliza el siguiente procedimiento:

$$\frac{h_{c,ac-a} D_o}{k} = 0,11 (0,5 Re_{\omega}^2 + Gr_D Pr)^{0,35}$$

donde los números adimensionales de Gr_D Ecuación 2.27 y Re_{ω} Ecuación 2.28 se calculan de la siguiente manera:

$$Gr_D = \frac{\rho^2 \beta g (T_s - T_a) D^3}{\mu^2}$$

$$Re_{\omega} = \frac{\rho \pi D^2 \omega}{\mu}$$

Entonces se determina el número de Reynolds para las siguientes condiciones:

Temperatura:

$$T_a = 302 \text{ K}$$

$$T_{sac} = 450.7 \text{ K}$$

$$T_f = \frac{T_a + T_{sac}}{2} = 376.35 \text{ K}$$

$$\omega = 231 \text{ rpm} = 24.19 \frac{1}{s}$$

$$g = 9.8 \frac{m}{s^2}$$

$$\beta = \frac{1}{T_f} = 2.657 \times 10^{-3} \frac{1}{K} \quad (4.19)$$

Se determina las propiedades del aire a la temperatura $T_f = 100^\circ$.

Tabla A-15; [Cengel and Hernán Pérez, 2004].

$$\rho_{aire} = 0.9458 \frac{kg}{m^3}$$

$$\mu_{aire} = 2.181 \times 10^{-5} \frac{kg}{m \cdot s}$$

$$k_{aire} = 0.03095 \frac{W}{m \cdot K}$$

$$Pr = 0.7111$$

$$Re_{\omega} = \frac{\rho_{aire} \cdot \pi \cdot d_{ac}^2 \omega}{\mu_{aire}} = 7912.73 \quad (4.20)$$

$$Gr_D = \frac{\rho_{aire}^2 \cdot \beta \cdot g \cdot (T_{oac} - T_a) d_{ac}^3}{\mu_{aire}^2} = 857262.31 \quad (4.21)$$

$$h_{c,ac-a} = \left[0, 11 (0, 5 Re_{\omega}^2 + Gr_D Pr)^{0,35} \right] \frac{k_{aire}}{d_{ac}}$$

$$h_{c,ac-a} = 29.39 \frac{W}{m^2 K} \quad (4.22)$$

4.2.3.2 COEFICIENTE DE RADIACIÓN

Donde la constante de Stefan-Boltzman es: $\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$. La temperatura media de superficie se calcula como la temperatura media entre el acero y del ambiente:

$$\varepsilon_{ac} = 0.9 .$$

$$T_a = 302 \text{ K}$$

$$T_{sac} = 450.7 \text{ K}$$

$$T_{m,ac-a} = \frac{T_{sac} + T_a}{2} = 376.35 \text{ K}$$

Para el cálculo del coeficiente es necesario indicar cual es la emisividad del acero, para los cálculos se tomará como: $\varepsilon_b = 0.9$. El coeficiente de radiación se calcula con la siguiente formula:

$$\begin{aligned} h_{r,ac-a} &= 4\varepsilon_{ac}\sigma T_{m,ac-a}^3 \\ h_{r,ac-a} &= 10.88 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \end{aligned} \quad (4.23)$$

4.2.3.3 BALANCE ENERGÉTICO PARA EL ACERO

Donde las condiciones iniciales y de frontera del balance térmico son.

$T_{ac} = 452 \text{ K}$ es la temperatura del acero.

$T_a = 302 \text{ K}$ es la temperatura ambiente.

$m_{ac} = 2.9271 \text{ kg}$ es la masa inicial del acero.

$cp_{ac} = 460 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$ es el calor específico del acero DF2. Tabla 29.

$t_{calent} = 10 \text{ min}$ es el intervalo de tiempo.

$T_{ac1} = 330.8 \text{ K}$ temperatura inicial.

$T_{ac2} = 301.4 \text{ K}$ temperatura final después de t_{calent} .

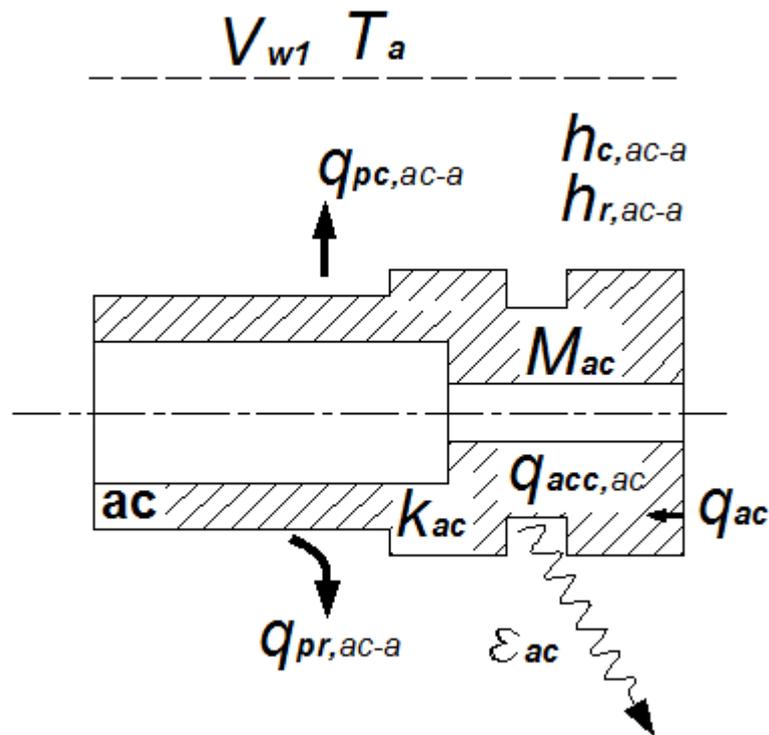


Figura 45: Balance Térmico del Acero.

- Calor perdido por convección es igual a:

$$q_{pc,ac-a} = h_{c,ac-a} A_{oac} (T_{ac} - T_a) = 67.87 \text{ W} \quad (4.24)$$

- Calor perdido por radiación es igual a:

$$q_{pr,ac-a} = h_{r,ac-a} A_{oac} (T_{ac} - T_a) = 25.125 \text{ W} \quad (4.25)$$

- Calor acumulado en el acero igual a:

$$q_{acc,ac} = \frac{m_{ac}}{t_{calent}} c_{pac} (T_{2ac} - T_{1ac}) = 65.98 \text{ W} \quad (4.26)$$

4.2.3.4 CALOR TOTAL PERDIDO EN EL ACERO

El calor total perdido en la probeta de acero es la suma de las Ecuaciones 4.24, 4.25, 4.26.

$$q_{ac} = q_{pc,ac-a} + q_{pr,ac-a} + q_{acc,ac} = 158.97 \text{ W} \quad (4.27)$$

4.2.4 CALOR TOTAL PERDIDO EN EL SISTEMA

El calor total perdido en el sistema térmico es igual a la suma entre el calor transmitido a la probeta de bronce q_b , Ecuación 4.16 y el calor transmitido a la probeta acero q_{ac} , Ecuación 4.27, el cual debe ser igual al calor generado por fricción q_{Gf} , Ecuación 4.2, en las áreas de contacto.

$$\begin{aligned} q_{tp} &= q_b + q_{ac} \\ q_{tp} &= 766.19\text{W} \end{aligned} \quad (4.28)$$

$$q_{Gf} = 832.59\text{W}$$

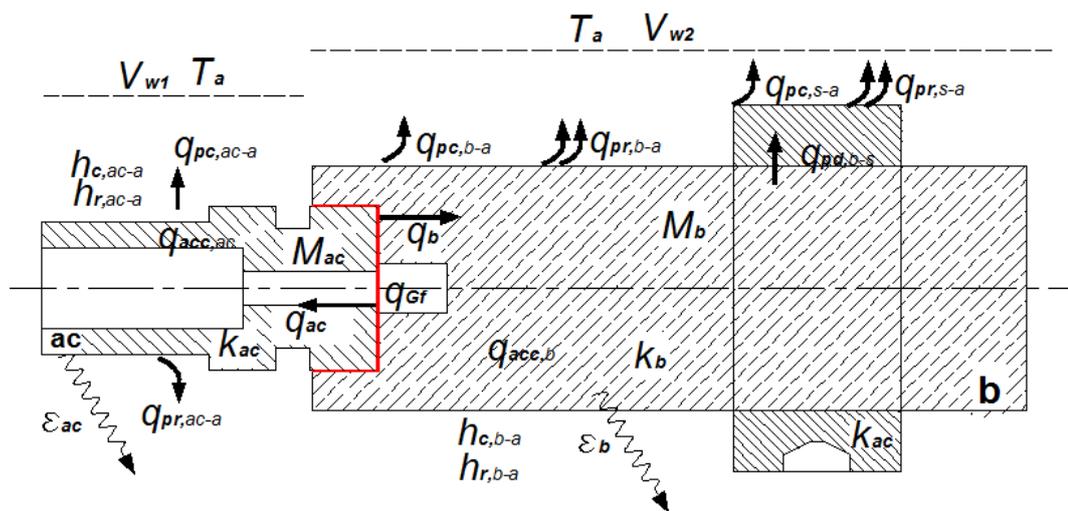


Figura 46: Balance Energético Total del Sistema.

Se procede a calcular el error entre la ecuación del calor generado por fricción y el balance energético total del sistema.

$$Error_{abs} = \left| \frac{q_{Gf} - q_{tp}}{q_{Gf}} \right| \cdot 100 = 8\% \quad (4.29)$$

4.3 ANÁLISIS DE TRANSFERENCIA DE CALOR DEL PAR DE FRICCIÓN PARA EL ESTADO TRANSITORIO Y ESTACIONARIO

4.3.1 ESTADO TRANSITORIO

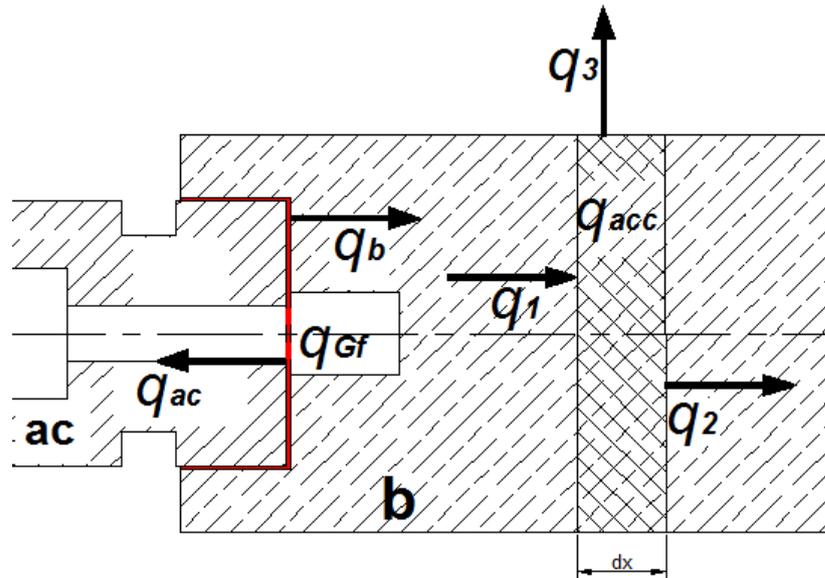


Figura 47: Balance Térmico del Par de Fricción Bronce-Acero.

Donde las áreas de conducción A y superficial \bar{A} son equivalentes a:

$$A = \frac{\pi D^2}{4} \quad (4.30)$$

$$\bar{A} = \pi D dx \quad (4.31)$$

El calor q_1 es el calor de entrada, q_2 es el calor de salida del diferencial, q_3 el calor perdido al ambiente y q_{acc} es el calor acumulado en el material.

$$q_1 = -kA \frac{\partial T}{\partial x} \quad (4.32)$$

$$q_2 = -kA \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(kA \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \quad (4.33)$$

$$q_3 = U\bar{A}(T - T_a) \quad (4.34)$$

$$q_{acc} = \rho c p A dx \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.35)$$

4.3.1.1 BALANCE TÉRMICO

Se realiza el balance energético en el diferencial.

$$\begin{aligned} E_e - E_s &= E_{acc} \\ q_e - q_s &= q_{acc} \\ q_1 - q_2 - q_3 &= q_{acc} \end{aligned}$$

Se reemplaza los valores de cada calor respectivo:

$$\begin{aligned} -kA \frac{\partial T}{\partial x} - \left[-kA \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(kA \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] - U\bar{A}(T - T_a) &= \rho \cdot cp \cdot A dx \frac{\partial T}{\partial t} \\ \cancel{kA} \frac{\partial T}{\partial x} - \left[\cancel{-kA} \frac{\partial T}{\partial x} + \frac{\partial}{\partial x} \left(-kA \frac{\partial T}{\partial x} \right) dx \right] - U\pi D dx (T - T_a) &= \rho \cdot cp \cdot A dx \frac{\partial T}{\partial t} \\ kA \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \cdot dx - U\pi D dx (T - T_a) &= \rho \cdot cp \cdot A dx \frac{\partial T}{\partial t} \\ A \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} \cdot dx - U\pi D dx (T - T_a) &= \rho \cdot cp \cdot A dx \frac{\partial T}{\partial t} \end{aligned}$$

Se divide la ecuación para $k \cdot A$

$$\begin{aligned} \frac{kA \partial^2 T}{kA \partial x^2} - \frac{U\pi D}{kA} (T - T_a) &= \frac{\rho \cdot cp \cdot A \partial T}{kA \partial t} \\ \frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{U\pi D}{kA} (T - T_a) &= \frac{\rho \cdot cp \partial T}{k \partial t} \end{aligned}$$

Se reemplaza la difusividad térmica $\alpha = \frac{k}{\rho cp}$

$$\frac{\partial^2 T}{\partial x^2} - \frac{U\pi D}{kA} (T - T_a) = \frac{1}{\alpha} \frac{\partial T}{\partial t} \quad (4.36)$$

Se reemplaza los términos K_1, K_2 y $\theta = T - T_a$

$$K_1 = \frac{U\pi D}{kA} \quad (4.37)$$

$$K_2 = \frac{1}{\alpha} \quad (4.38)$$

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - K_1 \theta = K_2 \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4.39)$$

El resultado es la una ecuación diferencial parcial de segundo orden la cual demuestra el fenómeno de flujo de calor.

4.3.1.2 SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DEL CALOR POR SEPARACIÓN DE VARIABLES

Se empleará el método de resolución de ecuaciones diferenciales parciales por separación de variables para la Ecuación 4.39:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - K_1 \theta = K_2 \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

Esta ecuación de calor presenta condiciones de frontera no homogéneas para la probeta de bronce; $\theta_b(0,t) = 450\text{K}$ $\theta_b(0.22,t) = 410\text{K}$, así que se procederá a determinar la solución total de sistema que es igual a $\theta = v + w + u$, donde $v(x,t)$ representa la solución de la ecuación homogénea, $u(x,t)$ es la solución de la ecuación diferencial parcial no homogénea y $w(x,t)$ es la solución del problema con condiciones de frontera no homogéneas.

Condiciones Iniciales: La condición inicial $\theta(x,t)|_{t=0}$ representa la temperatura inicial del material.

$$\theta(x,t)|_{t=0} = \varphi(x) = 30^\circ\text{C}$$

Condiciones de Frontera: Los valores de las temperaturas y las ecuaciones de la temperatura en función del tiempo son determinadas del Experimento 4, Capítulo 4.

$$\begin{cases} \theta(0,t) = \theta_1(t) \\ \theta(L,t) = \theta_2(t) \end{cases}$$

Las derivadas θ con respecto a X de la Ecuación 4.39

$$\begin{cases} \theta(x,t) = X(x) \cdot T(t) \\ \theta'(x,t) = X'(x) \cdot T(t) \\ \theta''(x,t) = X''(x) \cdot T(t) \end{cases}$$

La derivada de θ con respecto a T

$$\theta'(x,t) = X(x) \cdot T'(t)$$

Se reemplaza en la Ecuación 4.39 y queda:

$$\begin{aligned} X'' \cdot T - K_1 X \cdot T &= K_2 X \cdot T' \\ X'' \cdot T &= K_2 X \cdot T' + K_1 X \cdot T \\ X'' \cdot T &= X (K_2 T' + K_1 T) \\ \frac{X'' \cdot T}{X} &= K_2 T' + K_1 T \end{aligned}$$

Se iguala ambos términos a una constante $-\lambda$

$$\frac{X''}{X} = \frac{K_2 T' + K_1 T}{T} = -\lambda \quad (4.40)$$

- **Solución de la Ecuación Homogénea** cuando $\lambda = \alpha^2$, para $v(x, t) = X(x) \cdot T(t)$, con las siguientes condiciones de frontera:

$$\begin{cases} v(x, 0) = \varphi(x) = 30^\circ\text{C} \\ v(0, t) = v(L, t) = 0 \end{cases}$$

Solución para X en la Ecuación 4.40:

$$\begin{aligned} \frac{X''}{X} &= -\alpha^2 \\ X'' &= -\alpha^2 \cdot X \\ X'' + \alpha^2 \cdot X &= 0 \end{aligned}$$

Se resuelve la ecuación diferencial ordinaria:

$$\begin{cases} X = e^{mx} \\ X'' = m^2 e^{mx} \end{cases}$$

$$\begin{aligned} m^2 e^{mx} + \alpha^2 \cdot e^{mx} &= 0 \\ m^2 + \alpha^2 &= 0 \end{aligned}$$

Se determina los valores para m

$$\begin{cases} m_1 = -\alpha i \\ m_2 = \alpha i \end{cases}$$

$$X(x) = A_0 e^{\alpha i} + B_0 e^{-\alpha i}$$

$$X(x) = A \cos(\alpha x) + B \sin(\alpha x) \quad (4.41)$$

Para determinar los factores A y B se reemplaza las condiciones iniciales $v(0, t) = v(L, t) = 0$ en $X(x)$; por lo que $v(0, t) = X(0) \cdot T(t) \Rightarrow X(0) = 0$.

Se reemplaza la primera condición $v(0, t) = 0$ para encontrar A .

$$v(0, t) = 0$$

$$X(0) = 0$$

$$A \cos(\alpha x) + B \sin(\alpha x) = 0$$

$$A \cos(\alpha 0) + \cancel{B \sin(\alpha 0)} \rightarrow 0 = 0$$

$$\cancel{A \cos(\alpha 0)} \rightarrow 1 = 0$$

$$A = 0$$

Se reemplaza la segunda condición $v(L, t) = 0$ y se encuentra el valor de λ

$$v(L, t) = 0$$

$$X(L) = 0$$

$$A \cos(\alpha L) + B \sin(\alpha L) = 0$$

$$\cancel{A \cos(\alpha 0)} + B \sin(\alpha L) = 0$$

$$\sin(\alpha L) = 0$$

$$\alpha L = n\pi$$

$$\alpha = \frac{n\pi}{L}$$

$$\lambda = \frac{n^2 \pi^2}{L^2}$$

La solución para $X(x)$ queda expresada en la Ecuación 4.42

$$X(x) = B \sin(\alpha x) \quad (4.42)$$

Solución la T de la Ecuación 4.40:

$$\begin{aligned}\frac{K_2 T' + K_1 T}{T} &= -\alpha^2 \\ K_2 T' + T(K_1 + \alpha^2) &= 0\end{aligned}$$

Se resuelve la ecuación diferencial ordinaria

$$\begin{cases} T &= e^{mT} \\ T' &= me^{mT} \end{cases}$$

$$K_2 m e^{mT} + e^{mT} (K_1 + \alpha^2) = 0$$

Se determina el valor para m

$$m = -\frac{(K_1 + \alpha^2)}{K_2}$$

Se reemplaza m .

$$T(t) = C e^{-\left(\frac{K_1 + \alpha^2}{K_2}\right)t} \quad (4.43)$$

La solución combinada para $v(x, t)$

$$v(x, t) = X(x) \cdot T(t)$$

Se reemplaza los valores encontrados de $X(x) \cdot T(t)$ en las Ecuaciones 4.42 y 4.43 siendo B_n una constante combinada de C y B .

$$v(x, t) = [B_n] \cdot e^{-\left(\frac{K_1 + \alpha^2}{K_2}\right)t} \sin(\alpha x) \quad (4.44)$$

$$v(x, t) = [B_n] \cdot e^{-\left(\frac{K_1 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2}{K_2}\right)t} \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4.45)$$

$$v(x, t) = \sum_{n=1}^{\infty} [B_n] \cdot e^{-\left(\frac{K_1 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2}{K_2}\right)t} \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \quad (4.46)$$

donde B_n viene dada por la expresión:

$$B_n = \frac{2}{L} \int_0^L \varphi(x) \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) dx \quad (4.47)$$

- **Solución de la Ecuación no homogénea**, de la forma $\frac{\partial u}{\partial t} = a^2 \frac{\partial^2 u}{\partial x^2} + f(x,t)$, $t > 0$, $0 < x < L$

$$\begin{cases} u(x,0) = 0 \\ u(0,t) = u(L,t) = 0 \end{cases}$$

donde la solución de problema viene en la forma de la serie:

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} T_n(t) \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \quad (4.48)$$

donde.

$$f(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left(T'_n(t) + \frac{n^2\pi^2 a^2}{L^2} T_n(t) \right) \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \quad (4.49)$$

Se desarrolla la función $f(x,t)$ en serie de Fourier con respecto a senos:

$$f(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} f_n(t) \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \quad (4.50)$$

Se compara las dos ecuaciones anteriores y se obtiene:

$$T'_n(t) + \frac{n^2\pi^2 a^2}{L^2} T_n(t) = f_n(t) \quad (4.51)$$

La solución de la ecuación de $f_n(t)$ para las condiciones iniciales anteriores, la ecuación tiene la forma:

$$T_n(t) = \int_0^L f_n(a) e^{-\left(\frac{n^2\pi^2 a^2}{L^2}\right)(t-\alpha)} d\alpha, \quad n = 1, 2, 3, \dots \quad (4.52)$$

Se reemplaza la expresión para T_n en la serie de senos de Fourier obteniendo la solución para $u(x,t)$ del problema, siendo $f_n(a)$ una función de incremento de temperatura en función del tiempo.

$$u(x,t) = \sum_{n=1}^{\infty} \left[\int_0^L f_n(a) e^{-\left(\frac{n^2\pi^2 a^2}{L^2}\right)(t-\alpha)} d\alpha \right] \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \quad (4.53)$$

- **Solución del problema con Condiciones de Frontera no homogéneas.** Cuando $\lambda = \alpha^2 = 0$, para $w(x,t) = X(x) \cdot T(t)$

$$\begin{cases} w(x,0) = \varphi(x) = 30^\circ\text{C} \\ w(0,t) = \omega_1(t) \\ w(L,t) = \omega_2(t) \end{cases}$$

Solución para X de la Ecuación 4.40.

$$\begin{aligned} \frac{X''}{X} &= 0 \\ X'' &= 0 \\ X(x) &= C_1 + C_2x \end{aligned}$$

Reemplazando las condiciones iniciales $w(0,t) = \omega_1(t)$ y $w(L,t) = \omega_2(t)$ para encontrar los valores de C_1 y C_2

$$\begin{aligned} w(0,t) &= \omega_1(t) \\ X(0) &= \omega_1(t) \\ C_1 + C_2 \cdot 0 &= \omega_1(t) \\ C_1 &= \omega_1(t) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} w(L,t) &= \omega_2(t) \\ X(L) &= \omega_2(t) \\ C_1 + C_2L &= \omega_2(t) \\ C_2L &= \omega_2(t) - \omega_1(t) \\ C_2 &= \frac{\omega_2(t) - \omega_1(t)}{L} \end{aligned}$$

La solución para el problema con condiciones de frontera no homogéneas es igual a:

$$w(x,t) = \omega_1(t) + \frac{\omega_2(t) - \omega_1(t)}{L}x \quad (4.54)$$

donde $\omega_1(t)$ y $\omega_2(t)$ representan la Temperatura inicial y final respectivamente, y están en función del tiempo.

■ **Solución del problema general.** Viene dada por

$$\theta(x, t) = v(x, t) + w(x, t) + u(x, t) \quad (4.55)$$

$$\begin{cases} \theta(x, t)|_{t=0} = \varphi(x) - w(x) \\ \theta(0, t) = \theta_1(t) \\ \theta(L, t) = \theta_2(t) \end{cases}$$

Se reemplaza las Ecuaciones 4.46, 4.54, 4.53 en la Ecuación 4.55 y se obtiene la solución del problema térmico estudiado que viene dado por la Ecuación 4.56, en donde las funciones $\varphi(x)$, $\theta_1(t)$, $\theta_2(t)$, $f_n(a)$ dependen de cada material y cada experimento.

$$\begin{aligned} \theta(x, t) = & \sum_{n=1}^{\infty} B_n \cdot e^{-\left(\frac{K_1 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2}{K_2}\right)t} \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) + \theta_1(t) + \frac{\theta_2(t) - \theta_1(t)}{L}x \\ & + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\int_0^L f_n(a) e^{-\left(\frac{n^2\pi^2 a^2}{L^2}\right)(t-\alpha)} d\alpha \right] \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \end{aligned} \quad (4.56)$$

donde.

$$\begin{aligned} B_n &= \frac{2}{L} \int_0^L [\varphi(x) - w(x)] \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) dx \\ B_n &= \frac{2}{L} \int_0^L \left[\varphi(x) - \theta_1(t) + \frac{\theta_2(t) - \theta_1(t)}{L}x \right] \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) dx \end{aligned} \quad (4.57)$$

4.3.1.3 ECUACIÓN DEL CALOR PARA EL BRONCE

Parámetros K_1 y K_2 de la Ecuación del Calor.

Para determinar los parámetros K_1 y K_2 es necesario determinar las propiedades de los materiales como la conductividad, la capacidad calorífica, la densidad del bronce a la temperatura de trabajo así como el coeficiente global de transferencia de calor.

Propiedades.

Las propiedades térmicas del bronce se toman de la Tabla 30 a temperatura $T = 20^\circ\text{C}$ son:

$$k_b = 123 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

$$cp_b = 380 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

$$\rho_b = 8470 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Solución

■ Parámetro K_{b1}

La solución de K_{b1} depende del coeficiente global de transferencia de calor, la conductividad térmica del bronce, el diámetro y el área del eje.

Para el coeficiente global de transferencia de calor se utiliza los coeficientes de convección y de radiación de las Ecuaciones 4.5 y 4.6.

$$L_b = 220 \text{ mm}$$

$$D_b = 74 \text{ mm}$$

$$h_{c,b-a} = 4.51 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$h_{r,b-a} = 6.518 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$R_b = \frac{D_b}{2} = 37 \text{ mm}$$

$$h_{ob} = h_{c,b-a} + h_{r,b-a} = 4.51 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} + 6.518 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} = 11.028 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (4.58)$$

La resistencia térmica del bronce es igual a:

$$Rt_b = \frac{1}{2\pi \cdot R_b \cdot L_b \cdot h_{ob}} = 1.773 \frac{\text{K}}{\text{W}} \quad (4.59)$$

El coeficiente global de transferencia de calor viene dado por:

$$U_b = \frac{1}{\pi \cdot D_b \cdot L_b \cdot R_b} = 11.028 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (4.60)$$

Donde el área A_b esta resuelta en la Ecuación 4.3 y es igual a $4.30 \times 10^{-3} \text{ m}^2$; el valor de K_{b1} expresada anteriormente de la Ecuación 4.37 para el bronce es igual:

$$K_{b1} = \frac{U_b \cdot \pi \cdot D_b}{k_b A_b} = 4.846 \frac{1}{\text{m}^2} \quad (4.61)$$

■ **Parámetro K_{b2}**

Este parámetro depende de la difusividad térmica:

$$\alpha_b = \frac{k_b}{\rho_b \cdot c p_b} = \frac{123 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}}{8470 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 380 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}} = 3.82 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (4.62)$$

donde K_{b2} determinado en la Ecuación 4.38 para el bronce es igual a:

$$K_{b2} = \frac{1}{\alpha_b} = \frac{1}{3.82 \times 10^{-5} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 26167.48 \frac{\text{s}}{\text{m}^2} \quad (4.63)$$

■ **Solución de la Ecuación.**

Donde la ecuación del calor que describe el fenómeno de transferencia de calor para el bronce es:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - 4.846 \cdot \theta = 26167.48 \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4.64)$$

Con las condiciones iniciales son:

$$\theta(x, t)|_{t=0} = \varphi(x) = 30^\circ\text{C}$$

Y las condiciones de frontera son:

$$\begin{cases} \theta(0, t) = \theta_1(t) = 44.831 \ln(t) - 242.79 \\ \theta(L, t) = \theta_2(t) = 43.761 \ln(t) - 244.08 \end{cases}$$

$$f_n(s) = -3.99 \ln(s) + 35.55$$

Para encontrar la Solución a la Ecuación 4.64 se resolverá mediante el método de Series de Fourier anteriormente descrito cuya solución está en la Ecuación 4.56 donde se reemplaza las condiciones iniciales y de frontera para $n = 1, 2, 3, \dots, 10$ y $t_f = 11700\text{s}$:

$$L = 220\text{mm}$$

$$\begin{aligned} \theta_{4.b}(x, t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2}{L} \int_0^L \left[30 - \theta_1(t) + \frac{\theta_2(t) - \theta_1(t)}{L} x \right] \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L} x\right) dx \right] \\ &\times e^{-\left(\frac{4.846 + \left(\frac{n\pi}{L}\right)^2}{26167.48}\right)t} \cdot \sin\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \\ &+ 44.831 \ln(t) - 242.79 + \frac{43.761 \ln(t) - 244.08 - (44.831 \ln(t) - 242.79)}{L} x \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \left[\int_0^L -3.99 \ln(s) + 35.55 e^{-\left(\frac{n^2 \pi^2 a^2}{L^2}\right)(t-s)} ds \right] \sin\left(\frac{n\pi}{L} x\right) \quad (4.65) \end{aligned}$$

Se grafica la Ecuación 4.65 con $x = 0, 1, 2, 3, \dots, 0.22$ y $t = 0, 1, 2, 3, \dots, 11700$, como resultado se tiene la Figura 48:

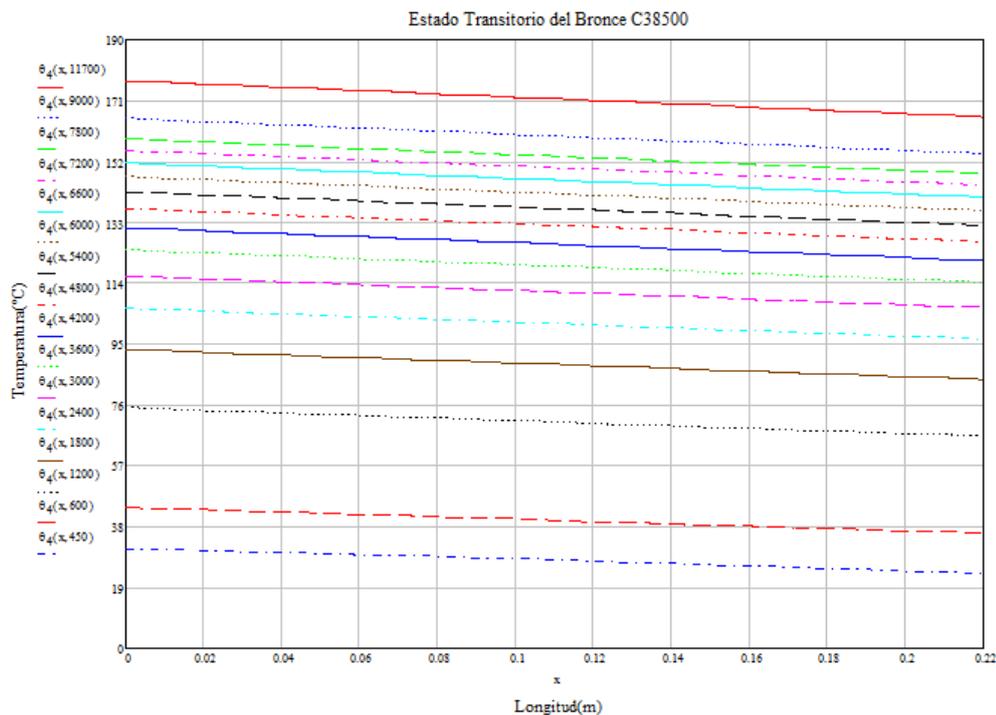


Figura 48: Estado Transitorio para el Bronce del Experimento 4.

Esta gráfica indica el comportamiento térmico del bronce en estado transitorio, es decir la variación de la temperatura en función de la distancia o longitud del bronce y el tiempo de calentamiento, presentando un comportamiento lineal debido a que el tiempo de análisis es muy elevado y el bronce presenta un elevado coeficiente de conducción térmica.

4.3.1.4 ECUACIÓN DEL CALOR PARA EL ACERO

Parámetros K_1 y K_2 de la Ecuación del Calor.

Para determinar los parámetros K_1 y K_2 es necesario determinar las propiedades de los materiales como la conductividad, la capacidad calorífica, la densidad del acero a la temperatura de trabajo así como el coeficiente global de transferencia de calor.

Propiedades.

Las propiedades del acero Tabla 29 a una temperatura $T = 20^\circ\text{C}$ son:

$$k_{ac} = 32 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

$$cp_{ac} = 460 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

$$\rho_{ac} = 7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$$

Solución

■ Parámetro K_{ac1}

La solución de K_{ac1} depende del coeficiente global de transferencia de calor, la conductividad térmica del bronce, el diámetro y el área del eje. Para el coeficiente global de transferencia de calor se utiliza los coeficientes de convección Ecuación 4.22 y de radiación Ecuación 4.23 .

$$\begin{aligned} L_{ac} &= 100 \text{ mm} \\ d_{ac} &= 49 \text{ mm} \\ h_{c,ac-a} &= 29.74 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \\ h_{r,ac-a} &= 10.81 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \end{aligned}$$

$$U_{ac} = h_{c,ac-a} + h_{r,ac-a} = 29.74 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} + 10.81 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} = 40.55 \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \quad (4.66)$$

Donde el área A_{ac} esta resuelta en la Ecuación 4.17 y es igual a $1.886 \times 10^{-3} \text{ m}^2$; el valor de K_{ac1} expresada en la Ecuación 4.37 es el siguiente para el acero:

$$K_{ac1} = \frac{U_{ac} \cdot \pi \cdot d_{ac}}{k_{ac} A_{ac}} = 103.45 \frac{1}{\text{m}^2} \quad (4.67)$$

■ Parámetro K_{ac2}

Este parámetro depende de la difusividad térmica tal como lo indica la Ecuación 4.38.

$$\alpha_b = \frac{k_{ac}}{\rho_{ac} \cdot c p_{ac}} = \frac{32 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}}{7800 \frac{\text{kg}}{\text{m}^3} \cdot 460 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}} = 9.034 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}} \quad (4.68)$$

donde.

$$K_{ac2} = \frac{1}{\alpha_b} = \frac{1}{9.034 \times 10^{-6} \frac{\text{m}^2}{\text{s}}} = 110687.5 \frac{\text{s}}{\text{m}^2} \quad (4.69)$$

■ Solución de la Ecuación

Se reemplaza los valores de K_{ac1} y K_{ac2} en la Ecuación 4.39, la ecuación del calor que describe el fenómeno de transferencia de calor para el acero es:

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - 103.45 \cdot \theta = 110687.5 \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \quad (4.70)$$

Con las condiciones iniciales:

$$\theta(x, t)|_{t=0} = \varphi(x) = 30^\circ\text{C}$$

Y las condiciones de frontera:

$$\begin{cases} \theta(0,t) = \theta_1(t) = 41.896 \ln(t) - 119.79 \\ \theta(L,t) = \theta_2(t) = 30.396 e^{0.0007t} \end{cases}$$

$$f_n(s) = -4.022 \ln(s) + 28.51$$

Para encontrar la Solución a la Ecuación 4.70 se resolverá mediante el método de Series de Fourier anteriormente descrito cuya solución es la Ecuación 4.56 se reemplaza las condiciones iniciales y de frontera para $n = 1, 2, 3, \dots, 10$ y $t_f = 11700s$:

$$L = 220\text{mm}$$

$$\begin{aligned} \theta_{4.ac}(x,t) &= \sum_{n=1}^{\infty} \left[\frac{2}{L} \int_0^L \left[30 - \theta_1(t) + \frac{\theta_2(t) - \theta_1(t)}{L} x \right] \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) dx \right] \\ &\times e^{-\left(\frac{103.45 + (\frac{n\pi}{L})^2}{110687.5}\right)t} \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \\ &+ 41.896 \ln(t) - 119.79 + \frac{30.396 e^{0.0007t} - 41.896 \ln(t) - 119.79}{L} x \\ &+ \sum_{n=1}^{\infty} \left[\int_0^L -4.022 \ln(s) + 28.51 e^{-\left(\frac{n^2 \pi^2 a^2}{L^2}\right)(t-\alpha)} d\alpha \right] \sin\left(\frac{n\pi}{L}x\right) \quad (4.71) \end{aligned}$$

Se grafica la Ecuación 4.71 con $x = 0, 1, 2, 3, \dots, 0.1$ y $t = 0, 1, 2, 3, \dots, 11700$, como resultado se tiene la Figura 49 :

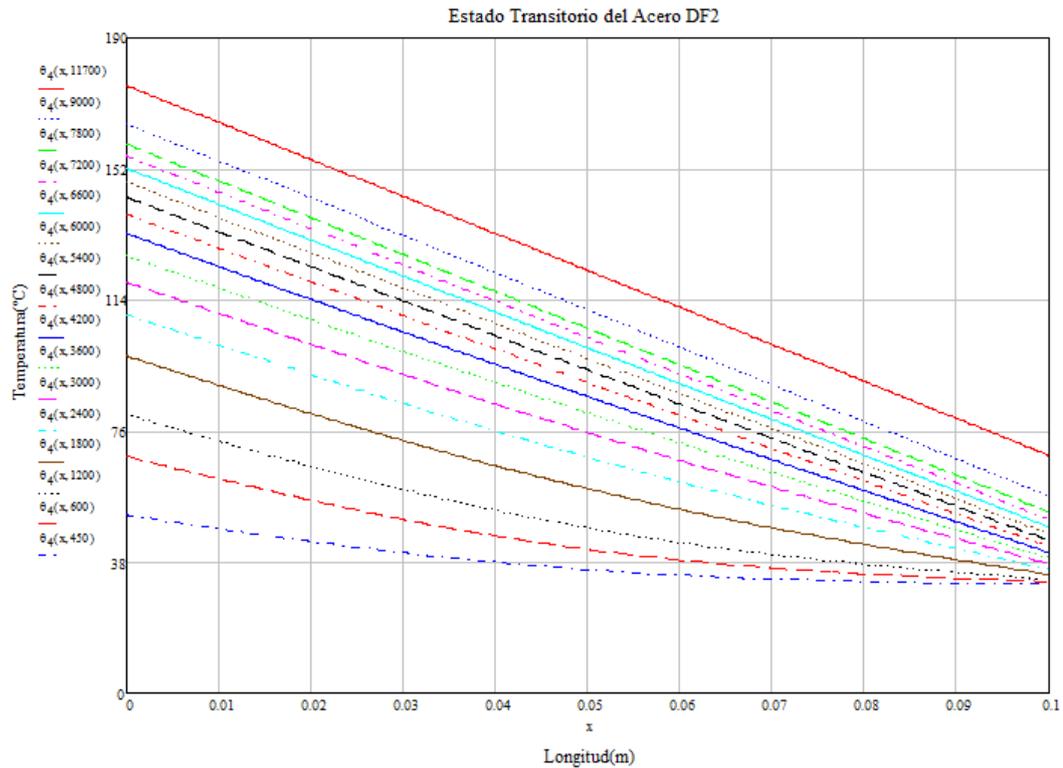


Figura 49: Estado Transitorio para el Acero Experimento 4.

En esta gráfica se observa el comportamiento térmico en la probeta de acero para un estado transitorio con una variación de la temperatura en función de la distancia o longitud de la probeta de acero y el tiempo de calentamiento, y se presenta un comportamiento inicial parabólico debido a las propiedades de conducción del acero, a medida que se incrementa la temperatura la distribución se comporta de manera lineal debido al tiempo elevado de análisis.

4.3.2 ESTADO ESTACIONARIO

4.3.2.1 SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DEL CALOR PARA EL BRONCE EN ESTADO ESTACIONARIO

Se tiene la Ecuación 4.64 que representa el estado transitorio del bronce; para el estado estacionario, se elimina la tasa de cambio de la temperatura en función del tiempo.

$$\frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - 4.846 \cdot \theta = 26167.48 \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t}$$

$$\frac{d^2 \theta}{dx^2} - 4.846 \cdot \theta = 0 \quad (4.72)$$

Se resuelve la Ecuación diferencial ordinaria, derivando la Ecuación $\theta = e^{mx}$ solución parcial de la Ecuación 4.72.

$$\theta = e^{mx}$$

$$\theta' = me^{mx}$$

$$\theta'' = m^2 e^{mx}$$

Se reemplaza las derivadas en la Ecuación 4.72 para determinar el coeficiente m

$$m^2 e^{mx} - 4.846 \cdot e^{mx} = 0$$

$$e^{mx} (m^2 - 4.846) = 0$$

$$m^2 - 4.846 = 0$$

$$m = \pm 2.20$$

Se obtiene como solución general para $\theta(x)$:

$$\theta = C_1 e^{2.20x} + C_2 e^{-2.20x} \quad (4.73)$$

Parámetros C_1 y C_2

Se toma la condición de frontera cuando $x = 0$:

$$\theta_o = T_o - T_a$$

$$\theta_o = 176^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C} = 146^\circ\text{C}$$

$$\theta_o = C_1 e^0 + C_2 e^0$$

$$\theta_o = C_1 + C_2 \quad (4.74)$$

Si $x = L$, siendo para el bronce $L = 0,22$ m y $\frac{d\theta}{dx} = 0$, entonces se deriva la Ecuación 4.73 e se iguala a cero, se obtiene C_1 en función de C_2 :

$$\begin{aligned} \theta &= C_1 e^{2.20x} + C_2 e^{-2.20x} \\ \frac{d\theta}{dx} &= 2.20C_1 e^{2.20x} - 2.20C_2 e^{-2.20x} \end{aligned} \quad (4.75)$$

Se resuelve la Ecuación 4.75

$$\begin{aligned} 2.20C_1 e^{2.20x} - 2.20C_2 e^{-2.20x} &= 0 \\ 2.20 \left(C_1 e^{2.20(0.22)} - C_2 e^{-2.20(0.22)} \right) &= 0 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
C_1 e^{2.20(0.22)} - C_2 e^{-2.20(0.22)} &= 0 \\
C_1 (1.623) - C_2 (0.616) &= 0 \\
C_1 &= \frac{C_2 (0.616)}{1.623} \\
C_1 &= C_2 (0.379) \\
C_2 &= 2.63C_1 \tag{4.76}
\end{aligned}$$

Se reemplaza la Ecuación 4.76 anterior en la Ecuación 4.74 y se obtiene C_1 y C_2 en función de θ_o

$$\begin{aligned}
\theta_o &= C_1 + C_2 \\
\theta_o &= C_1 + 2.63C_1 \\
\theta_o &= 3.63C_1 \\
C_1 &= 0.275\theta_o \tag{4.77}
\end{aligned}$$

;

$$\begin{aligned}
\theta_o &= C_1 + C_2 \\
\theta_o &= C_2 (0.379) + C_2 \\
\theta_o &= 1.379C_2 \\
C_2 &= 0.725\theta_o \tag{4.78}
\end{aligned}$$

Se reemplaza C_1 y C_2 en la Ecuación 4.73 y se obtiene la expresión de la transferencia de calor para el bronce en estado estacionario.

$$\begin{aligned}
\theta &= 0.275\theta_o e^{2.35x} + 0.725\theta_o e^{-2.35x} \\
\theta &= \theta_o \left[0.275e^{2.35x} + 0.725e^{-2.35x} \right]
\end{aligned}$$

$$\theta_o = 176^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C} = 146^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned}
\theta &= 146 \left[0.26e^{2.20x} + 0.738e^{-2.20x} \right] \\
\theta &= 37.96e^{2.20x} + 107.75e^{-2.20x} \tag{4.79}
\end{aligned}$$

4.3.2.2 SOLUCIÓN DE LA ECUACIÓN DEL CALOR PARA EL ACERO EN ESTADO ESTACIONARIO

Se tiene la Ecuación 4.70 que representa el estado transitorio del acero, para el estado estacionario, se elimina la tasa de cambio de la temperatura en función del tiempo.

$$\begin{aligned} \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - 130.45 \cdot \theta &= 110687.5 \cdot \frac{\partial \theta}{\partial t} \\ \frac{\partial^2 \theta}{\partial x^2} - 130.45 \cdot \theta &= 0 \end{aligned} \quad (4.80)$$

Se resuelve la Ecuación diferencial ordinaria, derivando la Ecuación $\theta = e^{mx}$ solución parcial de la Ecuación 4.80.

$$\theta = e^{mx}$$

$$\theta' = m e^{mx}$$

$$\theta'' = m^2 e^{mx}$$

Se reemplaza las derivadas en la Ecuación 4.80 para determinar el coeficiente m

$$\begin{aligned} m^2 e^{mx} - 130.45 \cdot e^{mx} &= 0 \\ e^{mx} (m^2 - 130.45) &= 0 \\ m^2 - 130.45 &= 0 \\ m &= \pm 10.17 \end{aligned}$$

Se obtiene como solución general para $\theta(x)$:

$$\theta = C_1 e^{10.17x} + C_2 e^{-10.17x} \quad (4.81)$$

Parámetros C_1 y C_2

Se toma la condición de frontera cuando $x = 0$:

$$\theta_o = T_o - T_a$$

$$\theta_o = 186^\circ\text{C} - 20^\circ\text{C} = 166^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned} \theta_o &= C_1 e^0 + C_2 e^0 \\ \theta_o &= C_1 + C_2 \end{aligned} \quad (4.82)$$

Si $x = L$, siendo para el acero $L = 0,1 \text{ m}$ y $\frac{d\theta}{dx} = 0$ entonces se deriva la Ecuación 4.81 y se iguala a cero obtenemos C_1 en función de C_2 :

$$\begin{aligned}\theta &= C_1 e^{10.17x} + C_2 e^{-10.17x} \\ \frac{d\theta}{dx} &= 10.17C_1 e^{10.17x} - 10.17C_2 e^{-10.17x}\end{aligned}\quad (4.83)$$

Se resuelve la Ecuación 4.83

$$\begin{aligned}10.17C_1 e^{10.17x} - 10.17C_2 e^{-10.17x} &= 0 \\ 10.17 \left(C_1 e^{10.17(0.1)} - C_2 e^{-10.17(0.1)} \right) &= 0 \\ C_1 e^{10.17(0.1)} - C_2 e^{-10.17(0.1)} &= 0 \\ C_1 (2.76) - C_2 (0.36) &= 0 \\ C_1 &= \frac{C_2 (0.36)}{2.76} \\ C_1 &= C_2 (0.13) \\ C_2 &= 7.69C_1\end{aligned}\quad (4.84)$$

Se reemplaza la Ecuación 4.84 en la Ecuación 4.82 y se obtiene C_1 y C_2 en función de θ_o

$$\begin{aligned}\theta_o &= C_1 + C_2 \\ \theta_o &= C_1 + 7.69C_1 \\ \theta_o &= 8.69C_1 \\ C_1 &= 0.115\theta_o\end{aligned}\quad (4.85)$$

;

$$\begin{aligned}\theta_o &= C_1 + C_2 \\ \theta_o &= C_2 (0.13) + C_2 \\ \theta_o &= 1.13C_2 \\ C_2 &= 0.885\theta_o\end{aligned}\quad (4.86)$$

$$\begin{aligned}\theta &= 0.115\theta_o e^{10.17x} + 0.885\theta_o e^{-10.17x} \\ \theta &= \theta_o [0.115e^{10.17x} + 0.885e^{-10.17x}]\end{aligned}$$

Se reemplaza C_1 y C_2 en la Ecuación 4.81 y se obtiene la expresión de la transferencia de calor para el acero en estado estacionario.

$$\theta_o = 186^\circ\text{C} - 30^\circ\text{C} = 156^\circ\text{C}$$

$$\begin{aligned}\theta &= 156 [0.115e^{10.17x} + 0.885e^{-10.17x}] \\ \theta &= 17.94e^{10.17x} + 138.06e^{-10.17x}\end{aligned}\quad (4.87)$$

4.4 TEMPERATURA DE CONTACTO

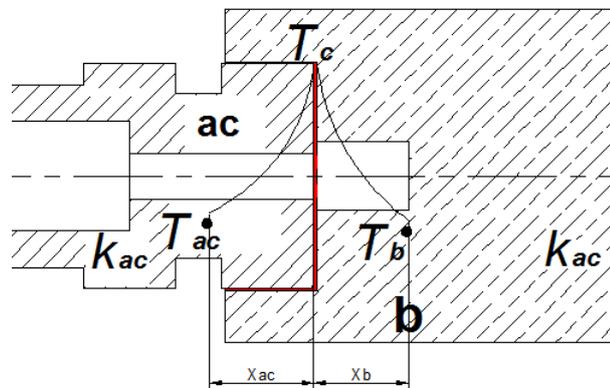


Figura 50: Temperatura de Contacto.

Se procederá a calcular la temperatura de contacto en el área de fricción a partir de las temperaturas cercanas al punto T_c y en las dimensiones x_{ac} para el acero y el bronce x_b , la deducción de la fórmula de la temperatura de contacto viene dada por un balance de energía en el punto de contacto entre los dos materiales, esto quiere decir que el calor generado por la fricción se distribuye al bronce y al acero como lo indica la Ecuación 2.43.

$$T_c = \frac{x_{ac}x_b \left[\frac{\frac{2}{3}\omega F_a [R_o^3 - R_i^3]}{\pi(R_o^2 - R_i^2)^2} \right] + k_{ac}T_{ac}x_b + k_bT_bx_{ac}}{k_{ac}x_b + k_bx_{ac}}$$

Para resolver esta ecuación es necesario determinar las distancias tanto del bronce y de acero en donde se tiene como datos las temperaturas, así como la conductividad térmica de cada material.

$$T_{ac} = 179.2^\circ\text{C} \text{ a } x_{ac} = 0.02\text{m}$$

$$T_b = 175.8^\circ\text{C} \text{ a } x_b = 0.015\text{m}$$

$$k_{ac} = 32 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

$$k_b = 123 \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$$

$$R_o = 25\text{mm}$$

$$R_i = 7.5 \text{ mm}$$

$$F_a = 220 \text{ kg} \cdot 9.8 \text{ m/s}^2 = 2156 \text{ N}$$

$$\omega = 235 \text{ rpm}$$

$$T_c = \frac{x_{ac}x_b \left[\frac{\frac{2}{3}\omega F_a [R_o^3 - R_i^3]}{\pi(R_o^2 - R_i^2)^2} \right] + k_{ac}T_{ac}x_b + k_bT_bx_{ac}}{k_{ac}x_b + k_bx_{ac}}$$

$$T_c = 231.50^\circ\text{C}$$

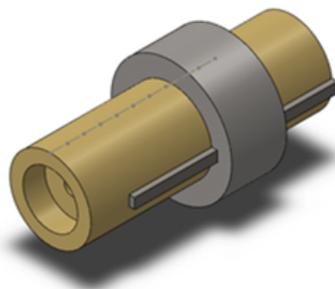
Se determina de esta forma la temperatura que existe en el área de contacto de fricción.

4.5 SIMULACIÓN TÉRMICA DEL SISTEMA

La Simulación del Par de Fricción está separado en dos partes: el calor que fluye a través del bronce y el calor que fluye a través del acero. Con los valores de entrada del experimento 4 se la realizó la simulación en un Software Libre. Las temperaturas finales de las probetas tienen que aproximarse a su valor real medido tanto en el extremo más cercano a la generación de calor como al punto más alejado

4.5.1 SIMULACIÓN TÉRMICA DEL ESTADO TRANSITORIO EN LA PROBETA DE BRONCE

Se carga el Modelo CAD en el cual se representa la probeta de bronce con el anillo sujetador y la chaveta de sujeción.



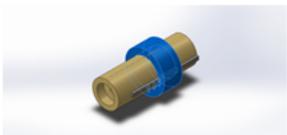
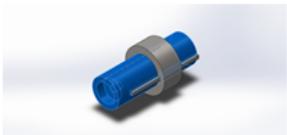
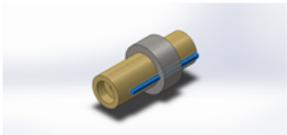
Nombre del modelo: Ensamble Bronce-Anillo
Configuración actual: Predeterminado

Figura 51: Simulación del Ensamble Bronce UNS C35800 - Anillo Sujetador.

Se carga la información del modelo y de cada parte en este caso anillo sujetador, probeta de bronce y chaveta de sujeción.

Tabla 31

Información del Modelo de Bronce-Anillo-Chaveta.

Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas
Cortar-Extruir2 	Sólido	Masa:1.87623 kg Volumen:0.000257018 m ³ Densidad:7300 kg/m ³ Peso:18.387 N
Cortar-Extruir3 	Sólido	Masa:7.60053 kg Volumen:0.000895234 m ³ Densidad:8490 kg/m ³ Peso:74.4852 N
Saliente-Extruir1 	Sólido	Masa:0.131066 kg Volumen:1.66962e-005 m ³ Densidad:7850 kg/m ³ Peso:1.28444 N

Se configura las condiciones iniciales de la simulación definiendo un Estudio Transitorio para 10800 segundos.

Tabla 32

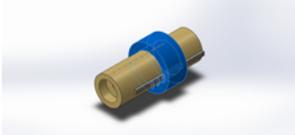
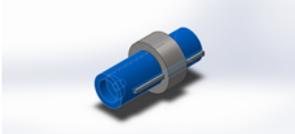
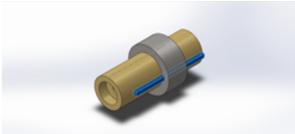
Propiedades del Estudio de la Probeta de Bronce.

Nombre de estudio	Estudio 1
Tipo de análisis	Térmico(Transitorio)
Tipo de malla	Malla sólida
Tipo de solver	FFEPlus
Tipo de solución	Transitorio
Tiempo total	10800 Segundos
Incremento de tiempo	300 Segundos

Se introduce las propiedades de cada material específico para el experimento.

Tabla 33

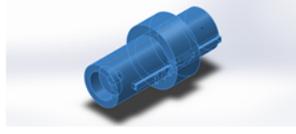
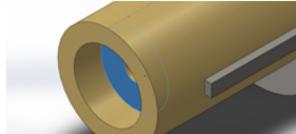
Propiedades de la Probeta de Bronce-Anillo-Chaveta.

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: Acero aleado fundido Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión máxima de von Mises Conductividad térmica: 52 W/(m.K) Calor específico: 440 J/(kg.K) Densidad: 7300 kg/m ³	Sólido 1(Cortar-Extruir2)(anillos de soporte - agujeros-2)
	Nombre: Latón, UNS C36000 Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Desconocido Conductividad térmica: 123 W/(m.K) Densidad: 8470 kg/m ³	Sólido 1(Cortar-Extruir3)(bronce corto-1)
	Nombre: AISI 1045 Acero estirado en frío Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Desconocido Conductividad térmica: 49.8 W/(m.K) Calor específico: 486 J/(kg.K) Densidad: 7850 kg/m ³	Sólido 1(Saliente-Extruir1)(cuñero-1)

Se carga las condiciones iniciales de cargas térmicas en los respectivos elementos.

Tabla 34

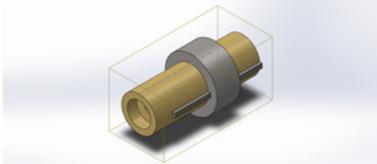
Cargas Térmicas de la Probeta de Bronce-Anillo-Chaveta.

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga	
Temperatura-1		Entidades: Temperatura inicial:	21 cara(s) 30 Celsius
Convección-1		Entidades: Coefficiente de convección: Variación de tiempo: Variación de temperatura: Temperatura ambiente: Variación de tiempo:	21 cara(s) 6.52 W/(m ² ·K) Desactivar Desactivar 303 Kelvin Desactivar
Radiación-1		Entidades: Radiación Tipo: Temperatura ambiente: Emisividad: Factor de vista:	21 cara(s) Superficie a ambiente 30 Celsius 0.55 0.5
Potencia calorífica-1		Entidades: Potencia calorífica Valor:	1 vértice(s), 1 cara(s) 125 W

Se configura el elemento con una unión de contacto global y rígida.

Tabla 35

Información del Contacto Probeta de Bronce-Anillo.

Contacto	Imagen del contacto	Propiedades del contacto
Contacto global		Tipo: Unión rígida Componentes: 1 componente(s) Opciones: Mallado compatible

Cuando se ha configurado el estudio térmico se procede a generar la malla con tamaño entre elemento de 11.26mm y con 9197 elementos.

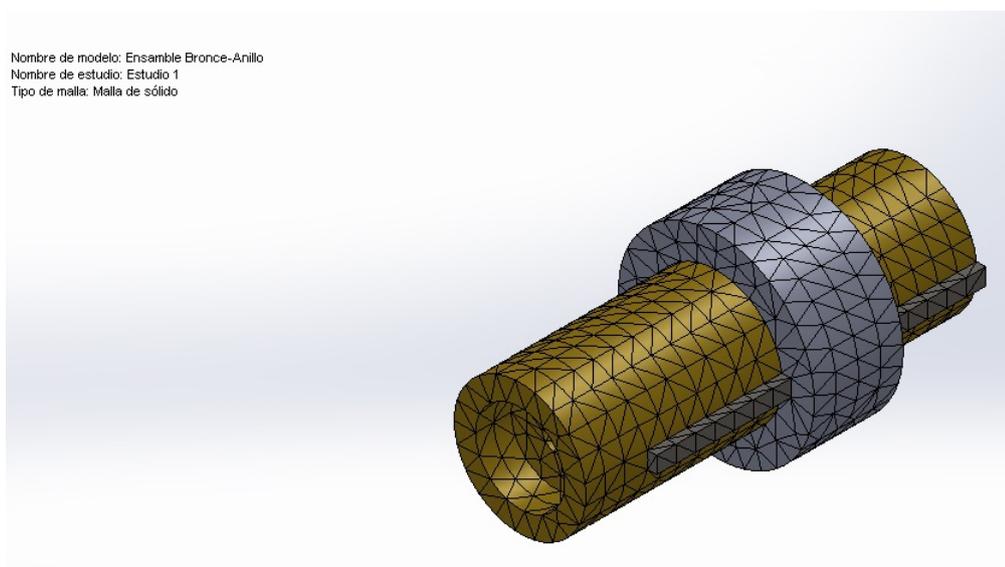


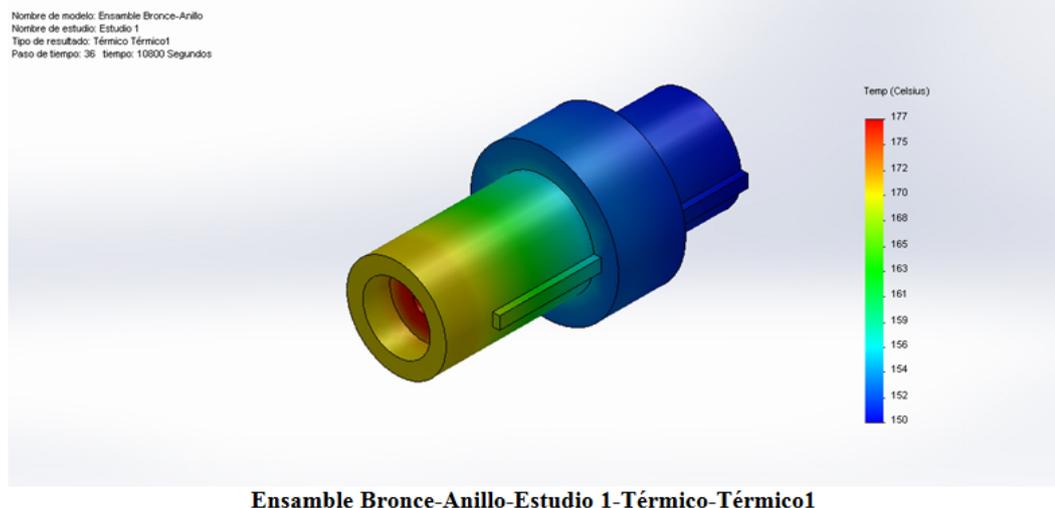
Figura 52: Mallado de la Probeta de Bronce-Anillo.

En la Tabla de resultados se observa el tiempo de simulación térmica, en este caso 10800 segundos con 36 pasos de 300 segundos, y se obtiene una temperatura máxima en el área de fricción de 176.84 °C y 149.51 °C en el extremo más alejado a la generación de calor. Con esta simulación se determina que la variación de temperatura entre extremos en una longitud de 220mm es de 26°C y se demuestra que la conductividad del bronce es alta de $123 \frac{W}{mK}$ y permite transmitir la temperatura generada por fricción.

Tabla 36

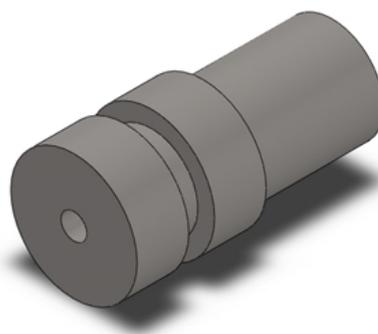
Resultados del Estudio de la Probeta de Bronce-Anillo.

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Térmico1	TEMP: Temperatura en paso n°: 36(10800 Segundos)	149.508 Celsius Nodo: 13591	176.854 Celsius Nodo: 5263



4.5.2 SIMULACIÓN TÉRMICA DEL ESTADO TRANSITORIO EN LA PROBETA DE ACERO

Se carga el Modelo CAD en el cual se representa la probeta de Acero.



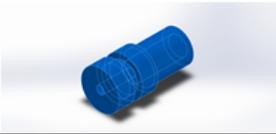
Nombre del modelo: Modelo Acero DF2
Configuración actual: Predeterminado

Figura 53: Simulación del Modelo Acero DF2.

Se carga la información del modelo de la probeta de acero DF2

Tabla 37

Información del Modelo de la Probeta de Acero.

Nombre de documento y referencia	Tratado como	Propiedades volumétricas
Revolución1 	Sólido	Masa:0.921611 kg Volumen:0.000118155 m ³ Densidad:7800 kg/m ³ Peso:9.03179 N

Se configura las condiciones iniciales de la simulación definiendo un Estudio Transitorio para 10800 segundos.

Tabla 38

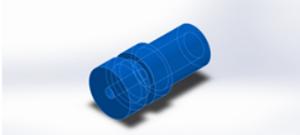
Propiedades del Estudio de la Probeta de Acero.

Nombre de estudio	Estudio 1
Tipo de análisis	Térmico(Transitorio)
Tipo de malla	Malla sólida
Tipo de solver	FFEPlus
Tipo de solución	Transitorio
Tiempo total	10800 Segundos
Incremento de tiempo	300 Segundos

Se introduce las propiedades de cada material específico para el experimento.

Tabla 39

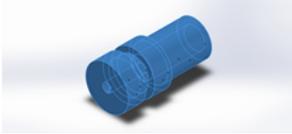
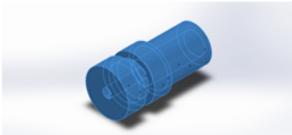
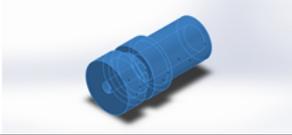
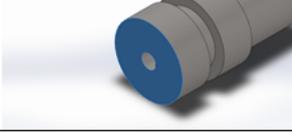
Propiedades del Material de la Probeta de Acero.

Referencia de modelo	Propiedades	Componentes
	Nombre: Acero DF2 Tipo de modelo: Isotrópico elástico lineal Criterio de error predeterminado: Tensión máxima de von Mises Conductividad térmica: 32 W/(m.K) Calor específico: 460 J/(kg.K) Densidad: 7800 kg/m ³	Sólido 1(Revolución1)(modelo acero1)

Se carga las condiciones iniciales de cargas térmicas en los respectivos elemento.

Tabla 40

Cargas Térmicas en la Probeta de Acero.

Nombre de carga	Cargar imagen	Detalles de carga	
Temperatura-1		Entidades: Temperatura inicial:	12 cara(s) 303 Kelvin
Convección-1		Entidades: Coefficiente de convección: Variación de tiempo: Variación de temperatura: Temperatura ambiente: Variación de tiempo:	12 cara(s) 29.7 W/(m ² ·K) Desactivar Desactivar 303 Kelvin Desactivar
Radiación-1		Entidades: Radiación Tipo: Temperatura ambiente: Emisividad: Factor de vista:	12 cara(s) Superficie a ambiente 30 Celsius 0.9 0.5
Potencia calorífica-1		Entidades: Potencia calorífica Valor:	1 cara(s) 100.00 W

Cuando se ha configurado el estudio térmico se procede a generar la malla con tamaño entre elemento de 4.9085mm y con 7485 elementos.

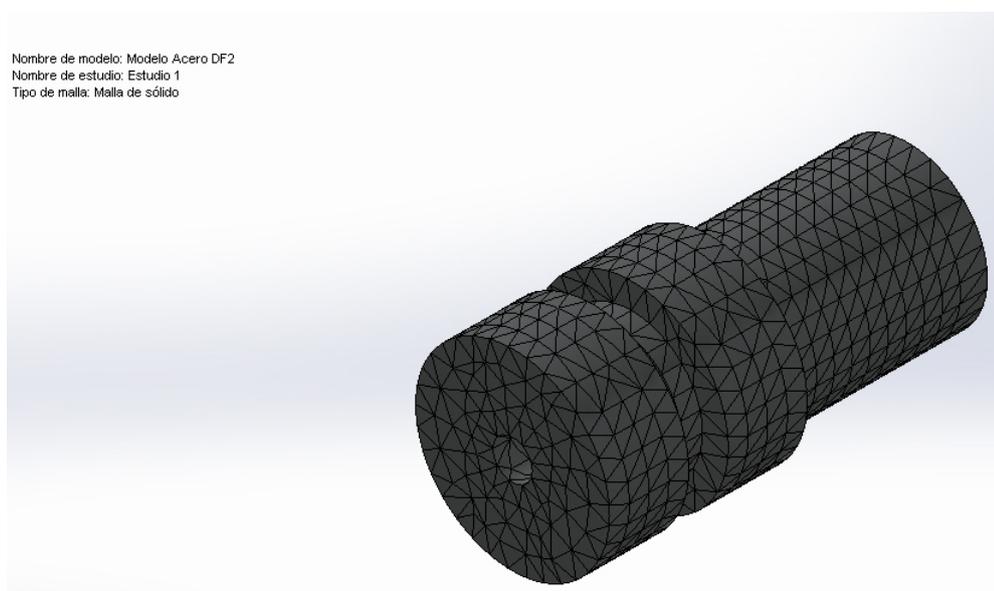


Figura 54: Mallado del Sólido de la Probeta Acero DF2.

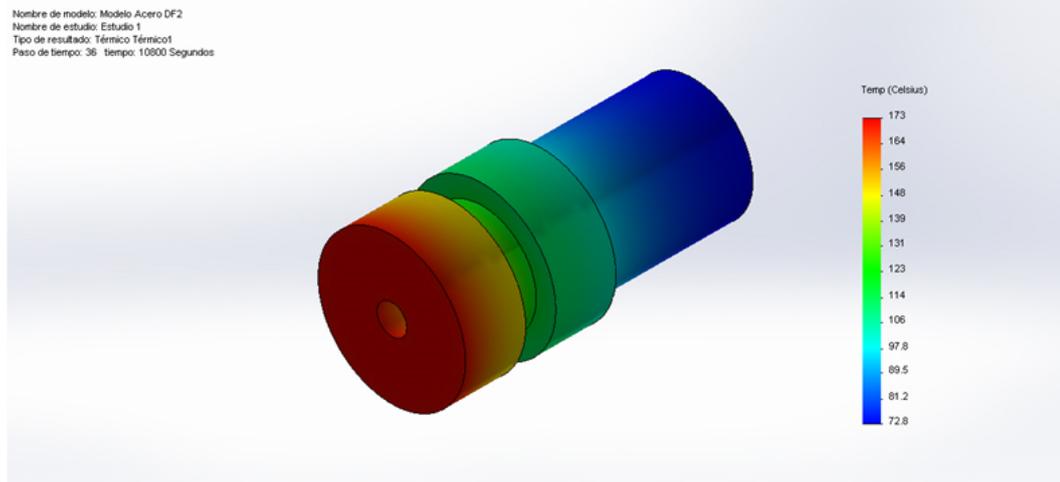
En la tabla de resultados se observa el tiempo de simulación térmica, en este caso 10800 segundos con 36 pasos de 300 segundos, y se obtiene una temperatura máxima en el área de fricción de 172.77 °C y 72.83 °C en el extremo opuesto a la generación

de calor donde se sujetará el mandril. De esta manera se observa el comportamiento del acero al enfriamiento por conducción debido a la rotación del mandril y a que la conductividad térmica del acero es de $32 \frac{W}{mK}$.

Tabla 41

Resultados del Estudio de la Probeta de Acero.

Nombre	Tipo	Mín.	Máx.
Térmico1	TEMP: Temperatura en paso n°: 36(10800 Segundos)	72.8285 Celsius Nodo: 607	172.773 Celsius Nodo: 903



Modelo Acero DF2-Estudio 1-Térmico-Térmico1

friccionará con la probeta de bronce. La probeta de bronce no girará ya que está bloqueada con la chaveta y esta a su vez con el anillo. El anillo se sujeta a la luneta del torno y esta a su vez a la bancada. El volante del contrapunto al girarlo proporciona movimiento axial del cono morse el mismo que comprime la celda de carga. La celda de carga mide la fuerza longitudinal y transmite dicha fuerza a la probeta de bronce.

Mediante la explicación anterior se verifica que la dos variables a combinar mediante el diseño de Taguchi son: La velocidad de giro de la probeta de acero y la fuerza de aplastamiento medida en la celda de carga. La fuerza de aplastamiento inicial tendrá tres niveles: 150 kg, 250 kg y 350 kg. Será la columna A en las siguientes tablas. La velocidad angular tendrá tres niveles: 250 rpm, 500 rpm y 1000 rpm. Será la columna B en las siguientes tablas.

Tabla 42

Arreglo Ortogonal L9.

	A	B
Experimento: 1	1	1
Experimento: 2	1	2
Experimento: 3	1	3
Experimento: 4	2	1
Experimento: 5	2	2
Experimento: 6	2	3
Experimento: 7	3	1
Experimento: 8	3	2
Experimento: 9	3	3

Se utiliza un arreglo ortogonal L9 para combinar los parámetros antes mencionados y se tiene:

Tabla 43

Arreglo L9 con Datos del Experimento.

	A	B
Experimento: 1	150 kg	500 rpm
Experimento: 2	350 kg	250 rpm
Experimento: 3	150 kg	250 rpm
Experimento: 4	250 kg	250 rpm
Experimento: 5	250 kg	1000 rpm
Experimento: 6	350 kg	1000 rpm
Experimento: 7	350 kg	500 rpm
Experimento: 8	250 kg	500 rpm
Experimento: 9	150 kg	1000 rpm

Por tanto las siguientes tablas muestran los 9 experimentos cada una con su respectiva pérdida de masa (desgaste que sufren las probetas) así como los resultados térmicos y energéticos.

5.1 EXPERIMENTOS

NOMBRE DEL PROYECTO DE INVESTIGACIÓN:

“ANÁLISIS DE LA PÉRDIDA DE MASA Y CALOR GENERADO EN UN PAR DE FRICCIÓN BRONCE-ACERO SOMETIDO A ENERGÍA MECÁNICA DE FRICCIÓN”

RESPONSABLES: Juan Sebastián Núñez Morales, Luis Fernando Paredes Paredes.

TUTOR: Ing. Víctor Andrade.

MAQUINARIA UTILIZADA: Torno de Santa Bárbara E.P (Capacidad 10CV)

5.1.1 EXPERIMENTO 1

FECHA: 13 de Enero del 2016.

HORA DE INICIO: 11:00 am

HORA DE FINALIZACIÓN: 15:10:00 pm

TEMPERATURA (Distancia entre termocuplas 20 mm)

Tabla 44

Variables Medidas Experimento 1.

		FUERZA DE APLASTAMIENTO		REVOLUCIONES
#	TIEMPO	(Kg)	(N)	REV (rpm)
1	11:08:00	80.24	786.352	139
2	12:08:00	110.31	1081.038	138
3	13:08:00	126.27	1237.446	136
4	14:08:00	130.5	1278.9	135
5	15:08:00	136.48	1337.504	133
Promedio		116.76	1144.248	136.2
Velocidad del viento		0.02m/s		

DATOS DE TEMPERATURA DEL BRONCE:

Tabla 45

Temperatura-Bronce Experimento 1.

P	Time	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	Ta(°C)
1	11:08:00	24.4	24.5	24.3	24.4	24.3	24.2	22.0
2	11:13:00	39.9	40.1	37.7	35.5	32.0	30.4	22.3
3	11:18:00	54.3	54.6	51.4	48.2	45.0	40.8	21.6
4	11:23:00	64.7	65.1	62.1	58.6	54.0	51.2	21.8
5	11:28:00	72.4	72.8	70.0	66.4	63.0	59.7	21.4
6	11:33:00	78.6	79.0	76.9	73.0	71.3	66.8	21.4
7	11:38:00	90.4	90.8	87.6	83.0	79.8	76.1	21.8
8	11:43:00	95.3	95.7	93.2	89.3	84.8	83.3	21.8
9	11:48:00	98.7	99.3	96.9	92.9	88.4	84.8	21.3
10	11:53:00	101.0	101.5	99.5	95.9	91.9	88.9	21.8
11	11:58:00	102.6	103.1	101.1	97.7	93.7	90.4	22.0
12	12:03:00	102.2	101.2	102.1	98.2	94.5	93.6	22.0
13	12:08:00	106.3	105.5	103.7	100.7	96.7	94.2	21.3
14	12:13:00	110.2	109.6	107.5	103.6	98.7	96.1	21.6
15	12:18:00	113.8	112.5	110.0	106.1	101.5	99.7	21.8
16	12:23:00	117.3	116.1	114.0	110.0	105.6	104.3	21.3
17	12:28:00	120.5	119.5	116.5	112.3	107.8	105.8	21.5
18	12:33:00	123.6	122.7	120.3	116.0	111.5	109.3	21.8
19	12:38:00	126.4	125.2	122.3	118.1	114.0	111.4	21.2
20	12:43:00	129.0	127.9	125.7	122.2	117.9	114.2	21.8
21	12:48:00	131.4	130.1	127.4	123.3	118.4	116.4	21.8
22	12:53:00	133.6	132.3	130.2	126.2	121.4	119.1	21.3
23	12:58:00	135.6	134.3	131.5	127.6	123.4	121.0	21.8
24	13:03:00	137.4	136.2	133.4	129.5	125.5	123.4	21.2
25	13:08:00	138.9	137.7	134.8	130.9	126.2	124.5	21.5
26	13:13:00	140.3	139.1	136.3	132.0	127.9	125.7	21.0
27	13:18:00	141.4	140.7	138.6	134.6	130.5	128.7	21.4
28	13:23:00	142.4	141.6	139.3	135.6	131.5	129.2	21.6
29	13:28:00	143.1	142.4	140.3	136.6	131.9	130.0	21.7
30	13:33:00	143.6	142.2	139.4	135.4	132.3	129.9	21.3

CONTINUA →

P	Time	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	Ta(°C)
31	13:38:00	143.9	142.9	140.9	136.6	132.1	131.5	21.7
32	13:43:00	144.0	143.2	141.0	137.1	132.2	131.7	21.5
33	13:48:00	143.9	142.5	139.8	135.7	133.0	131.4	21.3
34	13:53:00	143.6	142.5	139.8	136.0	132.8	132.0	21.1
35	13:58:00	143.0	141.5	139.1	136.2	132.2	132.1	21.3
36	14:03:00	142.9	141.5	139.2	136.0	132.7	132.6	21.2
37	14:08:00	142.3	141.2	138.9	136.1	133.0	132.4	21.7
38	14:13:00	142.8	142.1	140.1	136.5	133.5	132.8	21.7
39	14:18:00	142.1	140.6	138.2	136.6	133.4	132.5	21.1
40	14:23:00	142.7	141.4	138.5	136.8	133.1	132.7	21.5
41	14:28:00	142.6	141.7	139.5	136.9	133.7	132.8	21.1
42	14:33:00	142.3	141.3	138.7	137.2	133.7	133.2	21.4
43	14:38:00	142.0	141.3	139.5	137.4	133.9	133.5	21.1
44	14:43:00	142.0	140.8	139.6	137.7	133.9	133.5	21.4
45	14:48:00	141.5	140.9	139.8	137.8	134.1	133.7	21.0
46	14:53:00	141.5	141.0	139.8	138.2	134.9	134.3	21.6
47	14:58:00	141.3	140.7	139.6	138.5	134.9	134.4	21.9
48	15:03:00	140.5	139.2	139.1	138.6	135.2	134.3	21.0

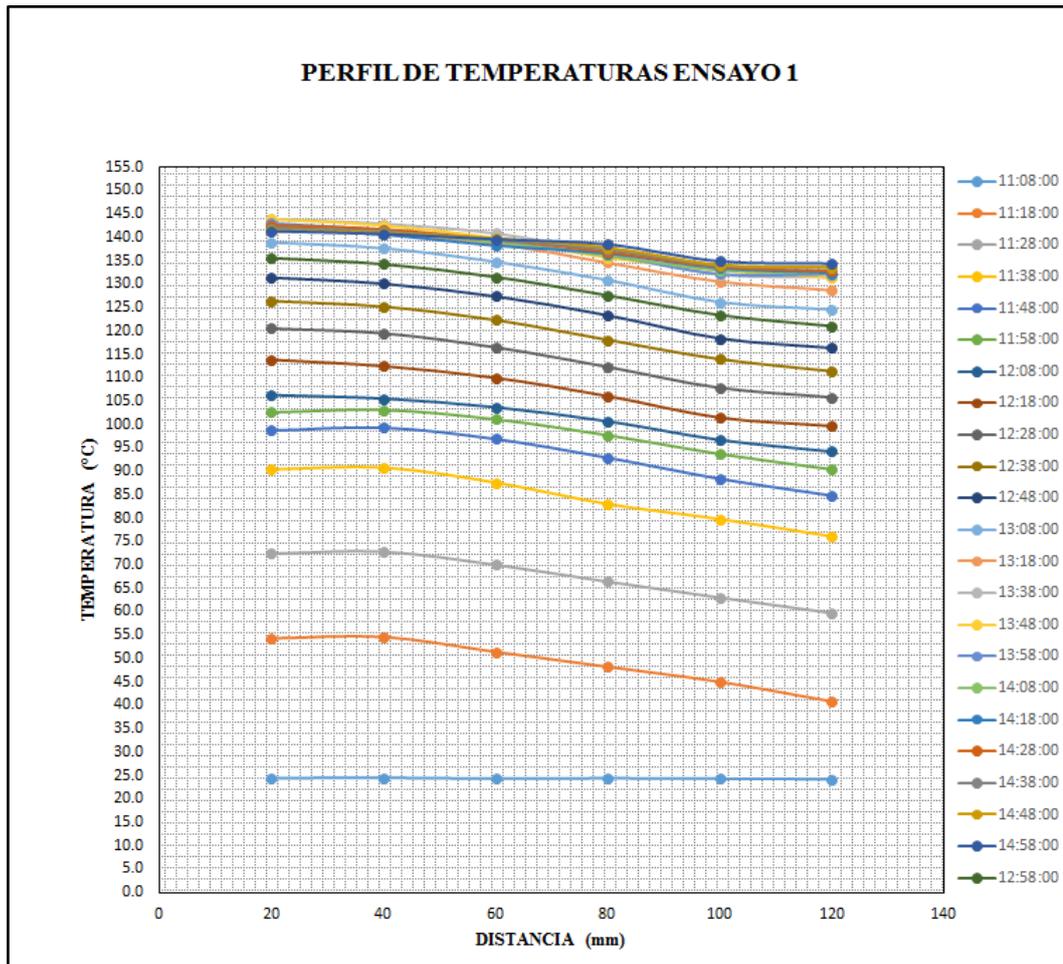


Figura 56: Perfil de Temperaturas Bronce UNS C35800 Experimento 1.

SIMULACIÓN TÉRMICA

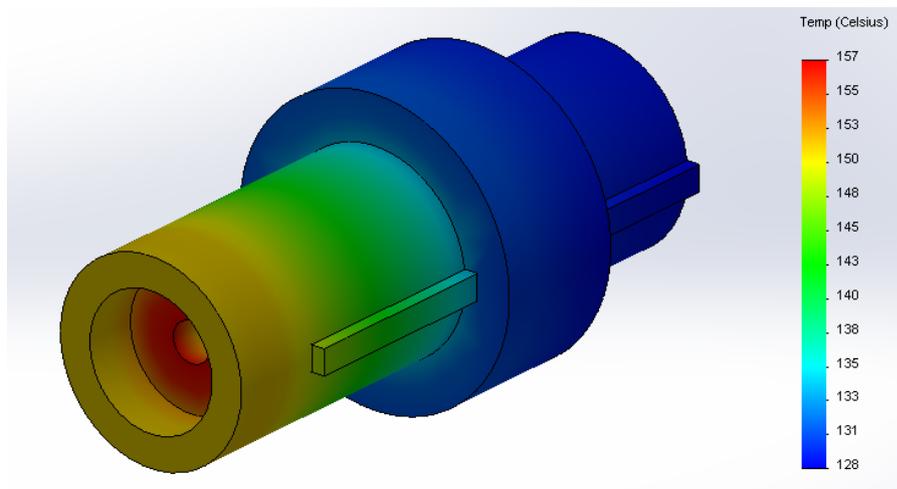


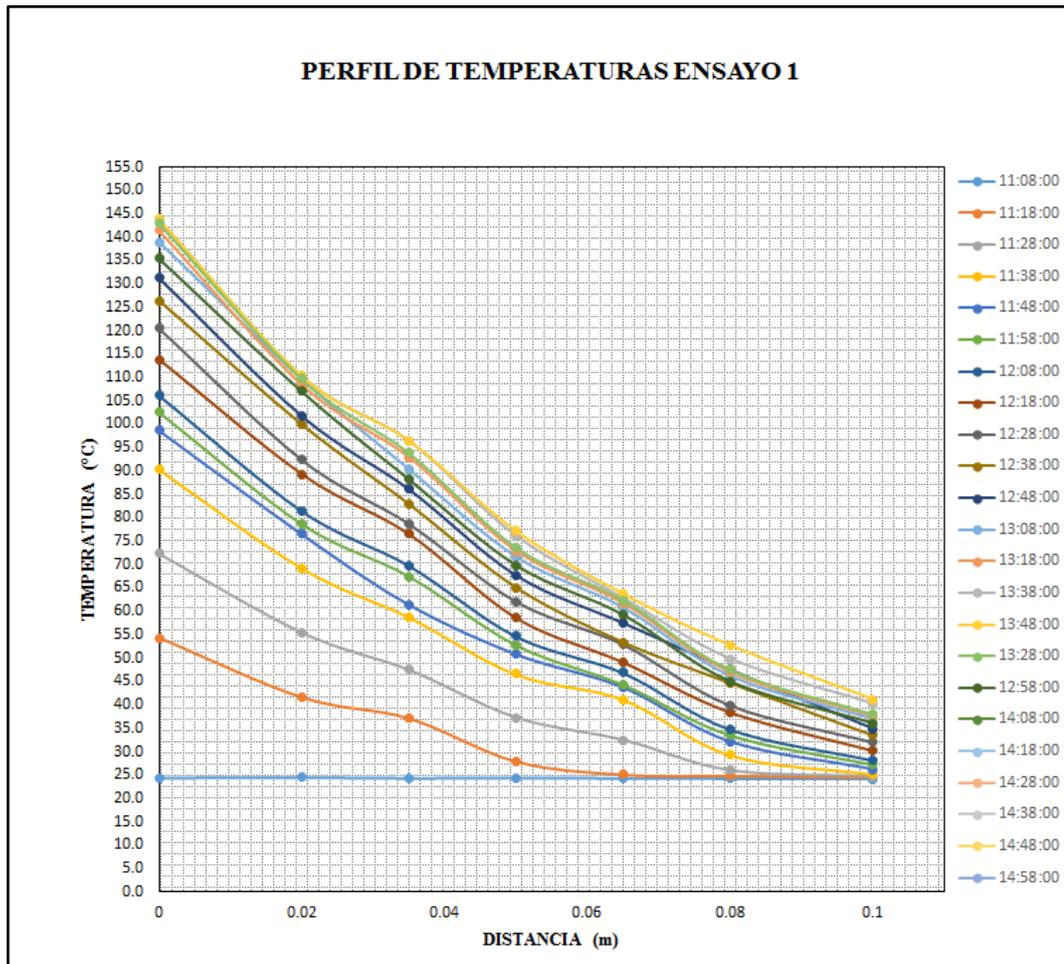
Figura 57: Simulación Térmica Bronce UNS C35800 Experimento 1.

DATOS DE TEMPERATURA DEL ACERO:

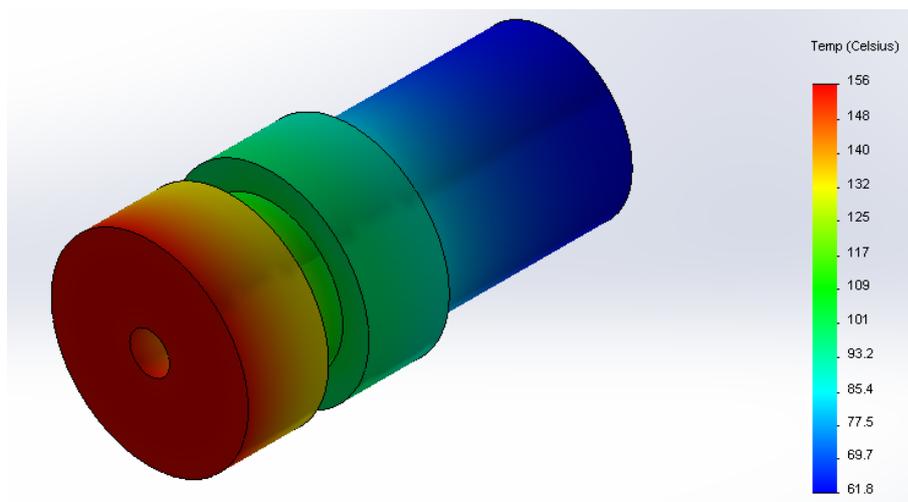
Tabla 47

Temperatura-Acero Experimento 1.

P	Time	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	Ta(°C)
1	11:08:00	24.4	24.5	24.3	24.4	24.3	24.2	24.1	22.0
3	11:18:00	54.3	41.7	37.2	28.0	25.1	24.8	24.5	21.6
5	11:28:00	72.4	55.5	47.5	37.3	32.6	25.1	24.7	21.4
7	11:38:00	90.4	69.4	58.9	46.6	40.2	29.3	25.2	21.8
9	11:48:00	98.7	75.7	64.1	50.9	43.7	32.2	26.2	21.3
11	11:58:00	102.6	78.7	67.5	52.9	45.4	33.5	27.3	22.0
13	12:08:00	106.3	81.5	69.8	54.8	46.9	34.8	28.3	21.3
15	12:18:00	113.8	86.3	74.6	58.7	49.1	37.4	30.3	21.8
17	12:28:00	120.5	92.5	78.8	62.1	52.9	39.8	32.0	21.5
19	12:38:00	126.4	97.0	83.0	65.2	55.4	41.8	33.6	21.2
21	12:48:00	131.4	103.8	86.1	67.7	56.5	43.5	34.9	21.8
23	12:58:00	135.6	107.0	88.3	69.9	59.3	45.0	36.0	21.8
25	13:08:00	138.9	109.6	90.4	71.6	60.7	46.1	36.9	21.5
27	13:18:00	141.4	108.5	92.9	72.9	61.8	47.0	37.6	21.4
29	13:28:00	143.1	109.8	94.0	73.8	62.5	47.6	38.0	21.7
31	13:38:00	143.9	110.4	96.5	76.2	62.8	49.9	40.2	21.7
32	13:48:00	144.0	110.5	96.6	77.2	63.9	52.9	41.3	21.5



SIMULACIÓN TÉRMICA



5.1.2 EXPERIMENTO 2

FECHA: 15 de Enero del 2016.

HORA DE INICIO: 10:30 am

HORA DE FINALIZACIÓN: 14:40 pm

TEMPERATURA (Distancia entre termocuplas 15 mm)

Tabla 49

Variables Medidas Experimento 2.

		FUERZA DE APLASTAMIENTO		REVOLUCIONES
#	TIEMPO	(Kg)	(N)	REV (rpm)
1	10:31:26	254.74	2496.452	250
2	12:08:00	269.88	2644.824	249
3	13:08:00	328	3214.4	230
4	14:08:00	333.61	3269.378	228
5	15:08:00	356.78	3496.444	222
Promedio		308.602	3024.2996	235.8
Velocidad del viento		0.54m/s		

DATOS DE TEMPERATURA DEL BRONCE:

Tabla 50

Temperaturas-Bronce Experimento 2.

P	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	T8(°C)	T9(°C)	Ta(°C)
1	25.2	25.4	24.8	25.0	24.4	24.3	24.1	24.1	23.9	27.3
2	38.5	38.3	36.8	37.2	35.3	33.8	33.3	30.7	28.5	27.7
3	66.4	64.4	63.8	62.3	58.3	54.1	50.2	46.7	35.3	24.9
4	89.9	86.4	84.0	82.2	79.4	76.8	73.9	65.6	51.3	25.0
5	114.4	110.5	109.3	107.8	104.2	100.6	96.7	87.0	71.3	24.7
6	133.8	129.8	127.9	126.6	124.3	119.1	116.4	106.9	91.9	25.9
7	191.0	185.1	179.5	172.7	162.9	154.5	143.5	136.5	130.6	24.9
8	227.0	216.3	210.4	203.0	198.4	188.0	176.5	168.7	161.8	24.6
9	254.5	244.0	238.6	230.5	222.1	212.0	203.7	199.5	192.5	25.8
10	268.8	258.2	252.1	244.8	234.8	228.6	216.8	211.1	203.0	25.2

CONTINUA →

P	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	T8(°C)	T9(°C)	Ta(°C)
11	280.0	269.1	266.3	255.4	245.3	239.4	232.8	220.7	213.9	24.1
12	298.1	291.6	286.2	275.2	268.0	259.3	253.0	240.4	234.1	24.7
13	307.3	299.6	293.9	282.2	275.1	265.6	258.9	247.0	240.3	24.1
14	311.8	306.0	300.9	289.7	282.6	273.3	267.2	254.1	247.6	25.0
15	316.7	308.2	303.1	291.5	284.4	274.3	268.0	255.3	249.2	24.9
16	321.5	316.8	311.0	299.5	292.2	281.9	275.6	263.0	257.0	24.1
17	326.5	318.3	312.6	301.1	293.9	284.0	277.3	264.9	258.3	24.7
18	331.5	325.6	320.5	308.9	301.2	291.3	285.1	272.3	266.2	25.4
19	336.6	328.3	323.2	312.0	304.4	294.1	287.2	274.5	268.2	24.5
20	341.8	336.1	330.4	319.3	312.2	300.3	293.7	281.0	274.9	25.6
21	347.0	338.0	332.6	321.3	313.6	303.3	296.7	284.7	278.0	25.7
22	347.2	338.4	334.7	323.7	314.8	306.0	297.1	285.2	279.6	24.6
23	348.1	339.7	335.6	324.3	315.4	305.0	298.6	286.4	280.5	24.7
24	348.9	341.1	336.2	325.4	316.3	306.3	299.2	287.4	281.0	25.7
25	349.6	342.9	337.3	326.4	317.6	305.9	299.9	288.9	282.3	25.8
26	349.9	343.1	338.6	327.6	318.8	306.5	300.6	289.4	283.6	25.3
27	350.7	345.5	339.8	328.2	319.9	305.1	301.7	290.0	283.9	24.5
28	351.4	346.7	340.7	328.6	320.2	308.5	302.9	291.7	284.2	24.8
29	351.6	344.7	340.5	329.4	321.0	308.0	302.3	292.7	285.5	24.6
30	351.6	346.9	341.6	330.2	322.9	309.3	303.7	293.0	285.8	25.5
31	352.6	345.0	341.2	330.6	322.7	308.0	302.5	294.4	286.8	24.4
32	352.7	347.4	342.1	330.9	323.3	309.2	303.9	295.7	287.3	24.4
33	353.1	345.3	342.6	331.5	324.2	308.1	302.6	296.0	288.0	24.1
34	353.4	348.6	342.9	332.0	325.0	311.7	306.5	297.4	289.1	25.4
35	353.7	349.3	343.0	333.3	325.4	312.3	307.2	298.7	290.0	24.8
36	354.0	349.4	343.6	335.5	327.9	314.4	308.9	299.1	292.9	24.7
37	354.2	349.7	343.8	336.4	328.4	315.6	309.9	300.4	293.4	25.5
38	354.2	349.9	344.1	336.5	329.5	316.8	311.7	301.8	294.5	24.9
39	354.6	350.3	344.5	337.7	329.9	318.2	312.3	303.1	295.8	24.1
40	354.8	350.8	345.1	338.0	331.0	321.8	315.9	304.5	296.0	24.1
41	355.6	351.7	346.3	339.0	331.4	322.7	317.3	305.8	297.2	24.4
42	353.7	351.9	348.5	340.0	332.0	323.1	318.5	307.1	298.5	24.0
43	353.1	352.1	349.3	340.9	333.4	323.5	319.2	308.5	299.7	25.1
44	353.8	352.7	350.8	341.9	334.2	323.9	319.7	309.8	300.9	25.9

CONTINUA →

P	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	T8(°C)	T9(°C)	Ta(°C)
45	353.6	353.1	350.0	342.8	335.1	324.4	320.5	311.2	302.1	25.7
46	353.1	353.1	350.1	343.8	336.1	325.1	322.6	312.5	304.4	25.8

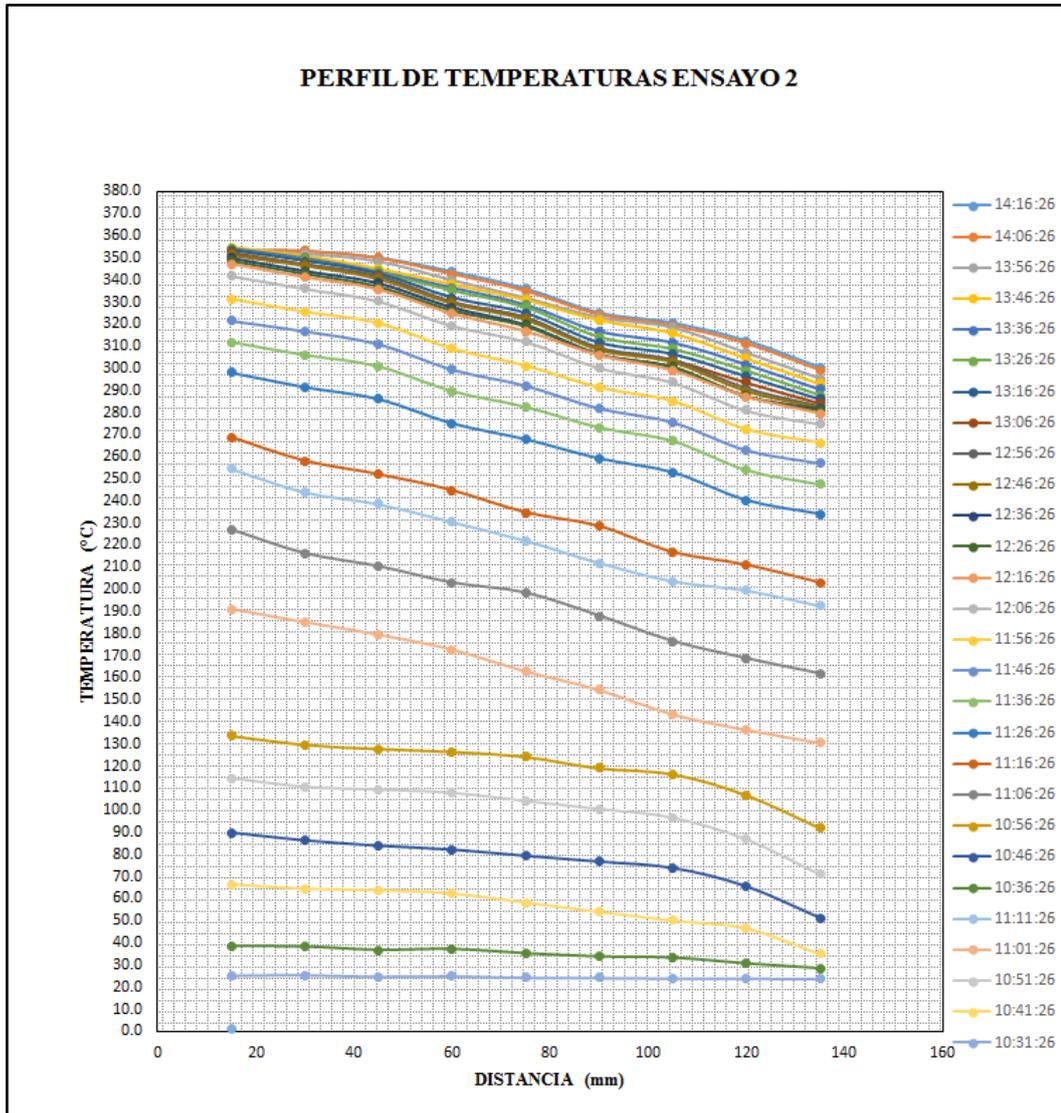


Figura 60: Perfil de Temperaturas Bronce UNS C35800 Experimento 2.

SIMULACIÓN TÉRMICA

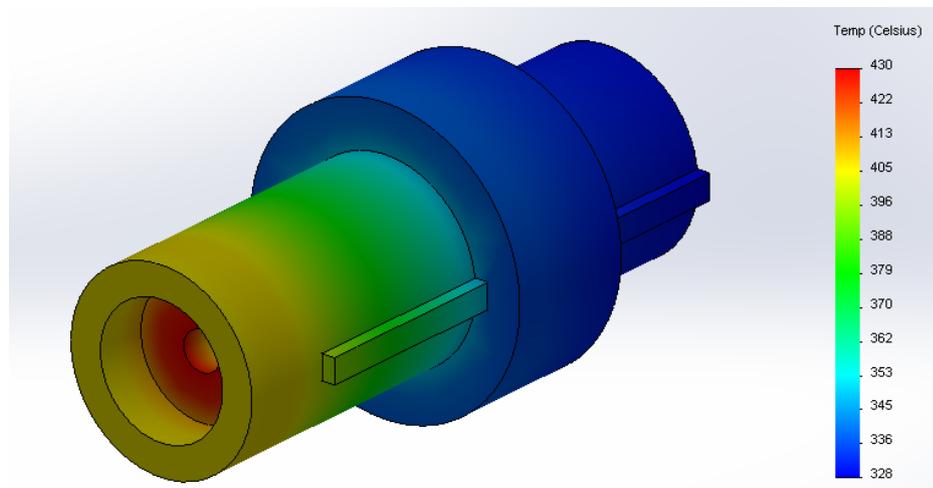


Figura 61: Simulación Térmica Bronce UNS C35800 Experimento 2.

DATOS DE TEMPERATURA DEL ACERO:

Tabla 52

Temperatura-Acero Experimento 2.

P	Time	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	Ta(°C)
1	10:31:26	25.2	25.4	24.8	25.0	24.4	24.3	24.1	27.3
3	10:41:26	66.4	52.9	48.7	34.2	25.1	24.8	24.5	27.7
5	10:51:26	114.4	87.7	75.9	58.9	50.3	39.6	28.7	24.9
7	11:01:26	191.0	146.5	127.1	98.4	82.7	61.1	45.2	25.0
9	11:11:26	254.5	195.2	167.0	131.2	109.5	83.1	62.6	24.7
11	11:21:26	280.0	214.8	179.0	134.3	120.3	92.0	69.4	25.9
13	11:31:26	307.3	232.7	191.2	151.4	126.8	103.4	78.6	24.9
15	11:41:26	316.7	242.9	206.1	163.2	135.8	104.7	79.1	24.6
17	11:51:26	326.5	250.5	214.3	168.3	140.0	113.1	81.7	25.8
19	12:01:26	336.6	254.2	220.7	179.5	155.2	125.6	93.4	25.2
21	12:11:26	347.0	273.6	235.0	192.0	161.5	139.2	110.9	24.1
23	12:21:26	347.4	280.4	245.3	208.9	171.2	152.2	123.8	24.7
25	12:31:26	348.1	289.8	247.0	212.8	180.1	155.2	125.7	24.1
27	12:41:26	349.6	285.9	253.9	215.2	188.8	158.9	134.3	25.0
29	12:51:26	350.7	289.3	253.8	219.4	188.2	162.4	133.7	24.9
31	13:01:26	351.6	297.4	259.6	221.6	191.6	165.8	137.1	24.1
32	13:11:26	352.6	296.1	261.6	227.5	198.1	172.6	144.0	24.7

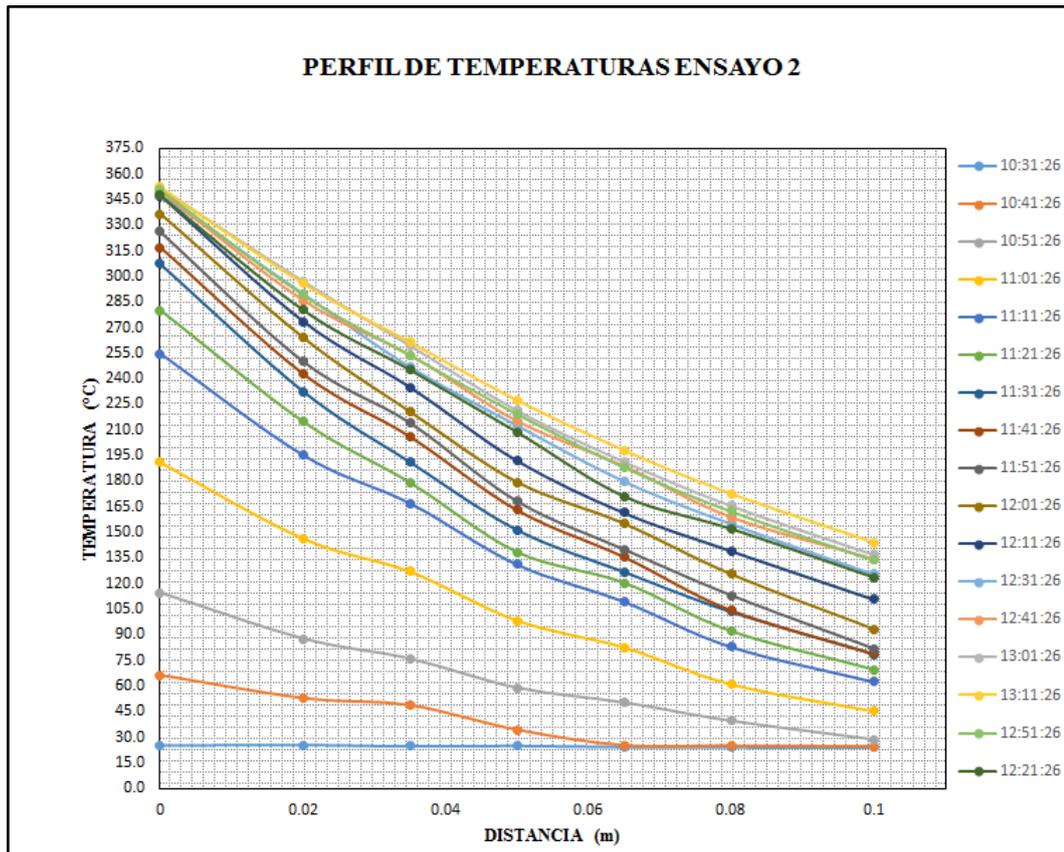


Figura 62: Perfil de Temperaturas Acero DF2 Experimento 2.

SIMULACIÓN TÉRMICA

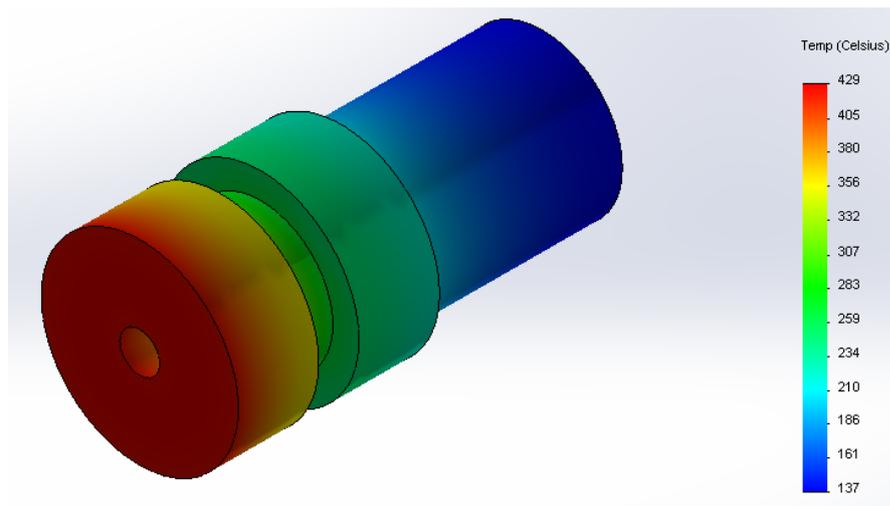


Figura 63: Simulación Térmica Acero DF2 Experimento 2.

5.1.3 EXPERIMENTO 3

FECHA: 18 de Enero del 2016.

HORA DE INICIO: 13:03 pm

HORA DE FINALIZACIÓN: 16:03 pm

TEMPERATURA (Distancia entre termocuplas 18 mm)

Tabla 54

Variables Medidas Experimento 3.

		FUERZA DE APLASTAMIENTO		REVOLUCIONES
#	TIEMPO	(Kg)	(N)	REV (rpm)
1	13:53:03	109.48	1072.904	250
2	14:08:00	114.79	1124.942	249
3	15:08:00	118.89	1165.122	247
4	16:08:00	133.82	1311.436	247
Promedio		119.245	1168.601	248.25
Velocidad del viento		0.59m/s		

DATOS DE TEMPERATURA DEL BRONCE:

Tabla 55

Temperatura-Bronce Experimento 3.

P	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	T8(°C)	Ta(°C)
1	32.7	32.3	31.8	31.9	31.8	31.9	31.7	31.9	30.8
2	50.3	48.1	45.9	44.5	42.7	41.2	38.9	38.5	30.8
3	55.9	54.2	52.2	50.7	49.1	47.5	45.3	44.8	29.2
4	59.4	58.2	56.5	55.3	53.8	52.5	50.3	50.1	30.4
5	63.6	62.0	60.2	58.8	57.4	56.1	54.5	54.2	30.0
6	70.3	68.6	66.6	64.8	63.6	61.5	59.8	59.6	27.7
7	74.6	72.8	70.9	69.0	67.0	65.8	64.2	64.1	30.1
8	79.0	76.8	74.9	72.9	71.6	69.5	68.0	68.1	29.7
9	82.9	80.7	78.7	76.5	74.8	73.3	71.8	71.8	28.9
10	85.5	83.5	81.5	79.1	77.7	75.9	74.9	74.9	27.8

CONTINUA →

P	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	T8(°C)	Ta(°C)
11	89.2	87.0	85.0	82.6	80.7	79.1	78.1	78.0	29.1
12	93.1	90.8	88.7	86.0	83.9	82.4	81.5	81.3	29.3
13	92.9	91.1	89.5	87.1	85.7	83.9	83.6	83.3	29.4
14	93.7	91.7	90.1	87.7	85.9	84.7	84.6	84.3	27.7
15	96.9	94.5	92.7	90.0	88.6	86.9	86.5	86.2	28.4
16	107.8	103.0	99.8	96.4	93.4	91.6	90.5	90.2	28.8
17	112.9	107.4	103.5	100.0	97.5	94.9	93.2	92.4	30.6
18	116.5	111.5	107.5	103.7	101.4	98.9	96.6	95.9	29.7
19	120.6	115.4	111.5	108.0	105.2	102.0	100.1	99.7	28.4
20	125.3	120.3	116.6	112.7	109.8	106.8	105.1	104.7	28.0
21	130.7	125.1	121.7	118.2	115.7	112.3	110.5	110.0	28.1
22	137.0	132.1	128.2	123.8	121.2	118.8	117.2	116.8	29.7
23	144.1	138.6	134.7	130.4	128.2	124.5	123.0	122.0	29.3
24	145.1	140.0	136.0	132.5	129.3	126.5	125.0	124.3	29.7
25	145.8	140.0	136.7	133.1	131.4	127.2	126.3	124.2	28.3
26	145.4	140.9	137.5	134.6	132.8	130.9	128.9	127.8	29.7
27	145.6	140.5	138.8	136.8	133.3	131.5	129.8	127.0	29.8

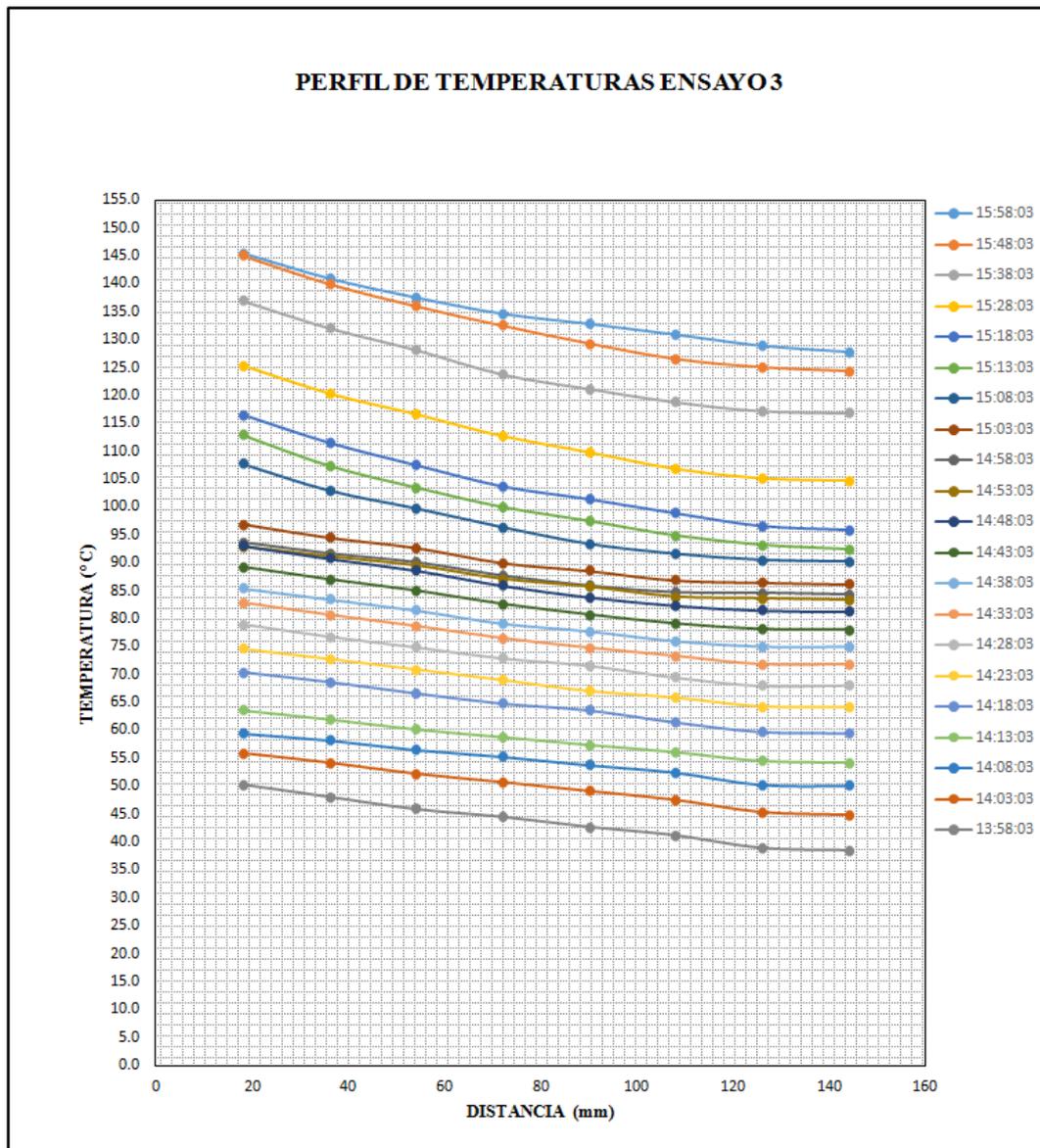


Figura 64: Perfil de Temperaturas Bronce UNS C35800 Experimento 3.

SIMULACIÓN TÉRMICA

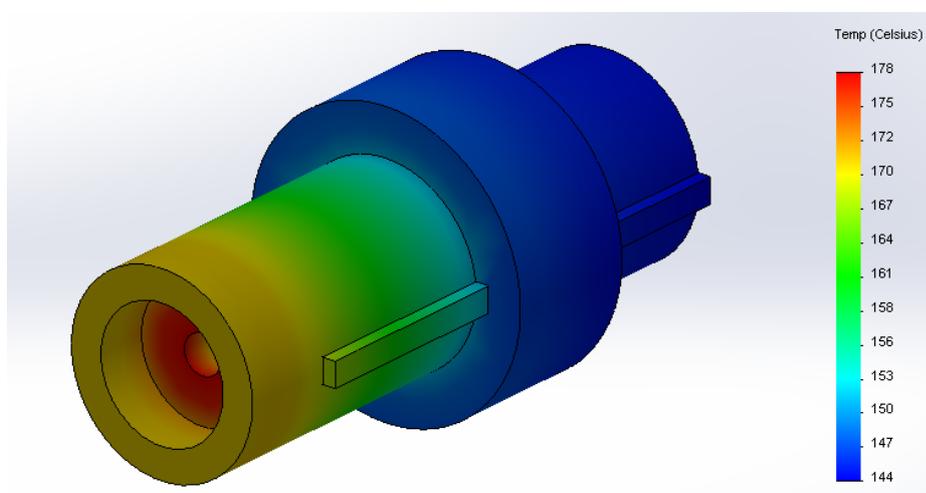


Figura 65: Simulación Térmica Bronce UNS C35800 Experimento 3.

DATOS DE TEMPERATURA DEL ACERO:

Tabla 57

Temperaturas-Acero Experimento 3.

P	Time	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	Ta(°C)
1	13:53:03	32.7	32.3	31.8	31.1	31.0	30.8	31.0	30.8
3	14:03:03	55.9	40.8	31.1	31.5	31.2	30.9	30.5	30.8
5	14:13:03	63.6	48.7	35.9	32.7	32.1	30.7	30.7	29.2
7	14:23:03	74.6	57.2	42.9	38.4	33.5	30.9	31.2	30.4
9	14:33:03	82.9	63.6	48.1	42.7	37.0	31.4	31.6	30.0
11	14:43:03	89.2	68.4	52.0	45.9	39.6	33.9	31.9	27.7
13	14:53:03	92.9	71.2	54.4	47.8	41.2	35.1	32.8	30.1
15	15:03:03	96.9	74.3	61.9	49.9	42.9	36.5	33.1	29.7
17	15:13:03	112.9	86.6	67.0	56.2	49.7	40.7	33.6	28.9
19	15:23:03	120.6	92.5	75.8	65.1	53.9	43.4	34.1	27.8
21	15:33:03	130.7	100.3	78.2	67.4	57.2	47.1	34.7	29.1
23	15:43:03	144.1	114.8	95.8	78.1	65.0	56.1	44.3	29.3
25	15:53:03	145.8	119.4	101.3	86.0	70.1	59.2	50.3	29.4
27	16:03:03	145.9	123.8	106.9	92.3	74.9	64.2	57.3	27.7

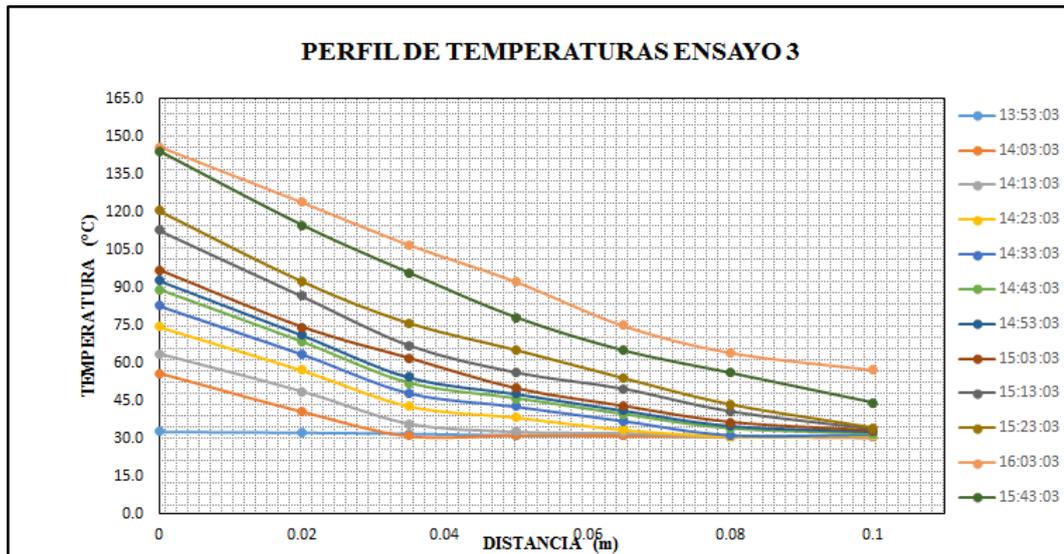


Figura 66: Perfil de Temperaturas Acero DF2 Experimento 3.

SIMULACIÓN TÉRMICA

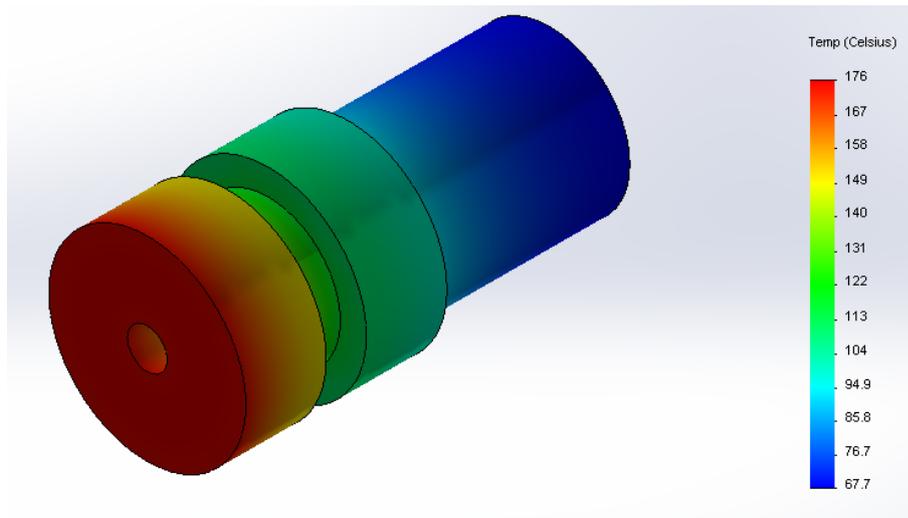


Figura 67: Simulación Térmica Acero DF2 Experimento 3.

5.1.4 EXPERIMENTO 4

FECHA: 19 de Enero del 2016.

HORA DE INICIO: 12:30 pm

HORA DE FINALIZACIÓN: 16:10 pm

TEMPERATURA (Distancia entre termocuplas 18 mm)

Tabla 59

Variables Medidas Experimento 4.

		FUERZA DE APLASTAMIENTO		REVOLUCIONES
#	TIEMPO	(Kg)	(N)	REV (rpm)
1	12:46:27	150.89	1478.722	250
2	13:46:27	195.61	1916.978	245
3	14:46:27	220.55	2161.39	231
4	15:08:00	235.47	2307.606	231
Promedio		200.63	1966.174	239.25
Velocidad del viento			0.57m/s	

DATOS DE TEMPERATURA DEL BRONCE:

Tabla 60

Temperaturas-Bronce Experimento 4.

P	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	T8(°C)	Ta(°C)
1	30.0	30.4	30.0	30.3	29.9	30.3	29.8	30.2	29.4
2	45.5	45.5	43.5	42.6	41.1	39.8	36.8	36.9	29.3
3	57.8	57.7	55.3	54.1	52.3	50.6	48.9	46.9	29.1
4	70.1	70.1	67.3	65.9	64.0	61.9	59.2	57.7	28.8
5	81.2	81.3	78.1	76.9	75.0	72.6	69.7	68.1	27.6
6	88.5	88.8	85.8	84.7	83.0	80.9	78.1	76.9	29.1
7	97.3	97.7	95.3	93.3	91.7	89.3	87.9	85.3	29.5
8	105.9	106.5	104.2	102.0	100.4	97.7	95.9	93.5	30.0
9	112.8	113.3	110.7	108.9	107.7	105.0	103.5	100.9	28.7
10	119.5	119.2	117.3	116.1	115.6	113.5	111.8	108.8	29.8
11	120.2	120.9	119.0	117.8	117.1	115.2	113.9	112.3	30.2
12	122.1	121.9	119.8	119.5	118.1	117.1	116.5	114.9	29.9
13	123.2	122.9	121.6	120.8	119.8	118.2	117.2	115.8	29.7
14	125.8	125.8	124.3	123.6	123.1	120.8	119.7	118.0	28.7
15	129.8	129.9	128.0	127.3	126.9	124.4	122.5	121.2	28.3
16	129.9	130.1	128.5	128.6	128.6	126.0	124.3	123.1	27.7
17	132.8	131.9	130.3	129.3	128.9	127.0	125.5	124.0	27.2
18	136.5	136.1	135.2	133.6	132.4	129.9	128.1	126.3	27.9
19	140.9	140.1	139.3	137.7	136.1	133.8	130.8	129.0	28.9
CONTINUA →									

P	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	T8(°C)	Ta(°C)
20	144.3	143.9	143.3	141.9	140.5	138.5	136.0	134.5	28.6
21	147.6	147.1	146.2	144.4	142.4	141.3	139.1	137.8	27.4
22	150.8	150.0	148.6	147.4	146.0	143.8	142.2	140.4	27.3
23	153.7	153.4	153.1	151.3	149.3	147.6	144.8	143.5	27.8
24	155.8	155.6	154.6	153.1	151.5	149.2	147.6	145.7	28.5
25	158.8	158.2	156.8	155.1	153.4	150.9	148.2	146.9	28.0
26	161.9	160.7	160.1	158.7	156.8	154.5	151.3	150.0	28.2
27	164.1	163.3	162.7	161.5	160.1	157.8	155.3	153.6	28.5
28	165.8	165.2	164.4	162.7	161.3	159.0	156.5	155.3	27.4
29	168.6	167.7	166.1	164.7	163.2	160.6	158.0	156.8	27.6
30	170.2	169.3	168.2	167.1	165.9	163.8	161.5	160.2	28.9
31	172.1	171.7	170.4	168.6	167.3	165.2	163.2	161.9	27.3
32	173.8	172.7	171.1	170.0	168.1	166.4	163.8	162.2	27.7
33	175.8	174.6	173.5	172.2	170.9	168.1	165.5	163.9	28.8
34	177.4	176.9	175.5	174.4	173.2	170.5	168.9	167.1	28.2
35	178.4	177.2	176.7	175.0	173.2	171.5	170.0	168.3	27.0
36	178.9	177.8	176.9	175.8	173.5	172.7	171.8	170.5	28.1
37	179.2	178.1	177.3	176.4	173.7	172.5	172.1	170.6	27.4
38	179.1	178.8	177.8	176.9	174.6	173.7	172.3	171.2	27.9
39	178.8	178.5	178.3	177.2	175.4	174.2	172.3	171.7	28.8
40	179.0	178.7	178.6	177.7	175.8	174.8	172.9	172.2	29.0

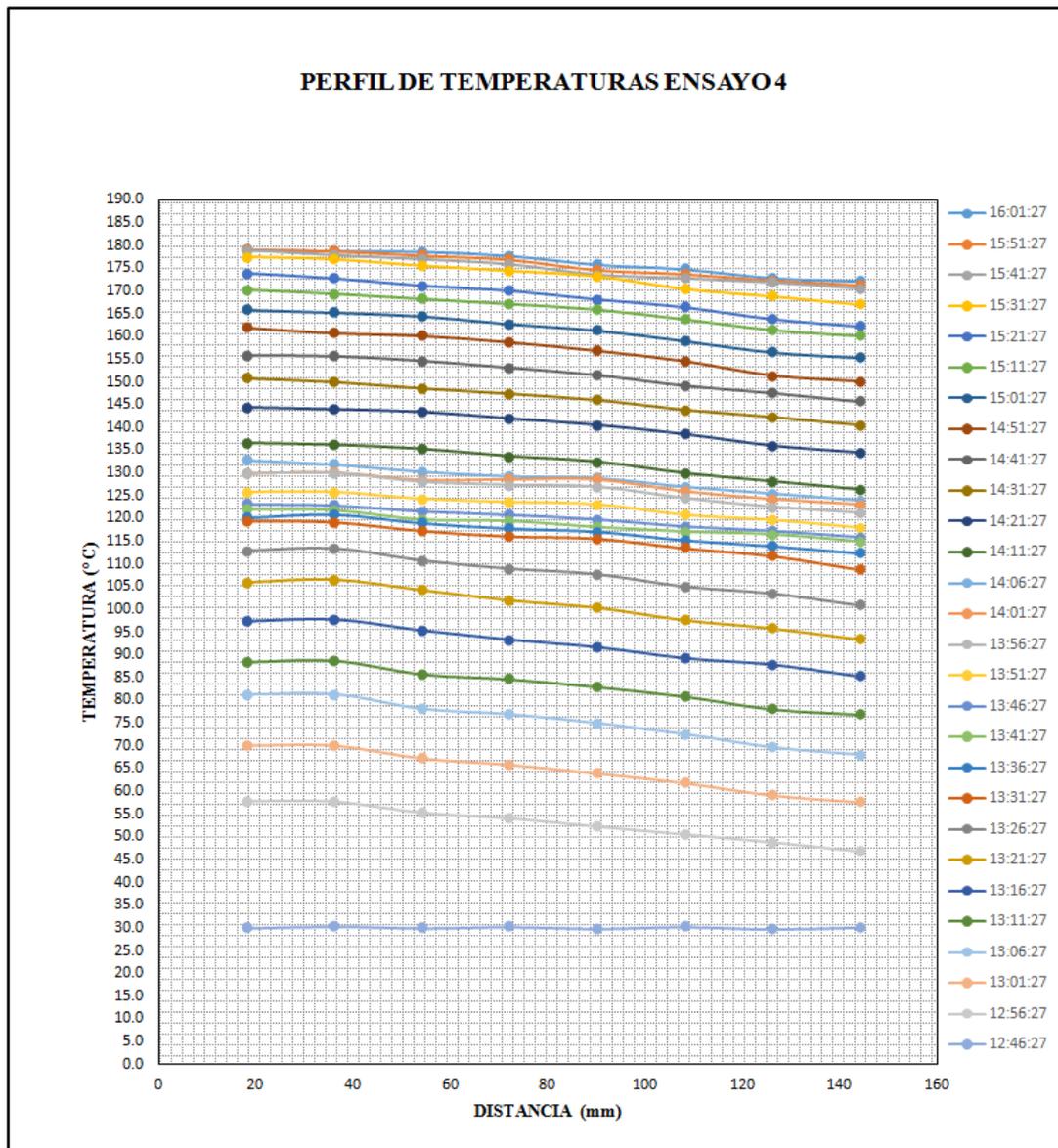


Figura 68: Perfil de Temperaturas Bronce UNS C35800 Experimento 4.

SIMULACIÓN TÉRMICA

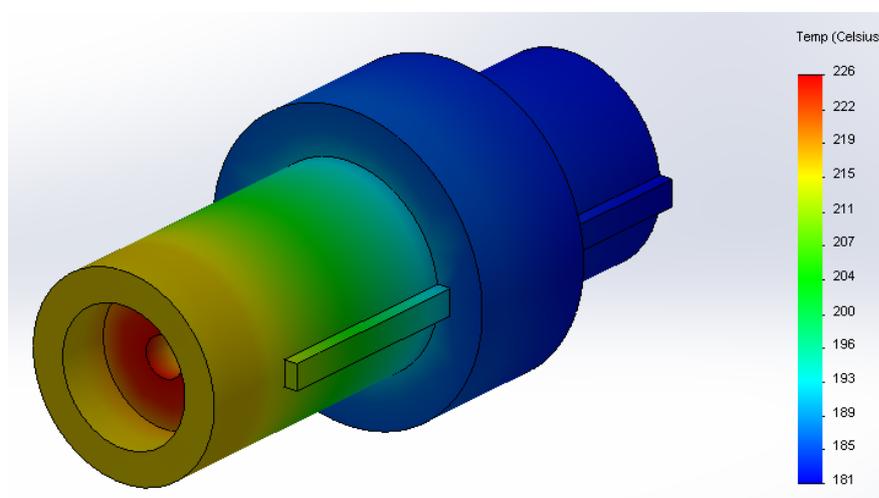


Figura 69: Simulación Térmica Bronce UNS C35800 Experimento 4.

DATOS DE TEMPERATURA DEL ACERO:

Tabla 62

Temperaturas-Acero Experimento 4.

P	Time	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	Ta(°C)
1	12:46:27	30.0	30.4	30.0	30.3	29.9	30.3	30.1	29.4
3	12:56:27	57.8	42.3	38.3	29.7	30.2	30.8	30.5	29.3
5	13:06:27	81.2	59.2	53.0	39.8	35.5	30.1	30.7	29.1
7	13:16:27	97.3	74.6	63.1	50.1	43.1	31.7	29.2	28.8
9	13:26:27	112.8	86.5	72.9	56.1	49.6	37.0	29.9	27.6
11	13:36:27	120.2	92.2	79.5	61.9	52.8	39.6	31.9	29.1
13	13:46:27	123.2	94.5	81.4	63.5	54.0	40.6	32.7	29.5
15	13:56:27	129.8	99.5	85.6	66.9	56.8	42.9	34.5	30.0
17	14:06:27	132.8	101.8	87.5	68.4	58.1	44.0	35.3	28.7
19	14:16:27	140.9	108.1	93.6	72.6	61.5	46.8	37.4	29.8
21	14:26:27	147.6	113.2	97.8	76.1	66.3	49.1	39.2	30.2
23	14:36:27	153.7	117.9	101.7	79.2	68.9	51.2	40.8	29.9
25	14:46:27	158.8	124.3	103.9	84.9	72.1	53.0	42.2	29.7
27	14:56:27	164.1	131.0	111.9	88.9	78.0	59.6	46.2	28.7
29	15:06:27	168.6	137.4	117.7	96.1	83.1	63.5	50.7	28.3
31	15:16:27	172.1	143.0	128.2	103.1	90.4	71.8	56.7	27.7
33	15:26:27	175.8	146.1	131.2	110.7	100.3	81.8	63.7	27.2

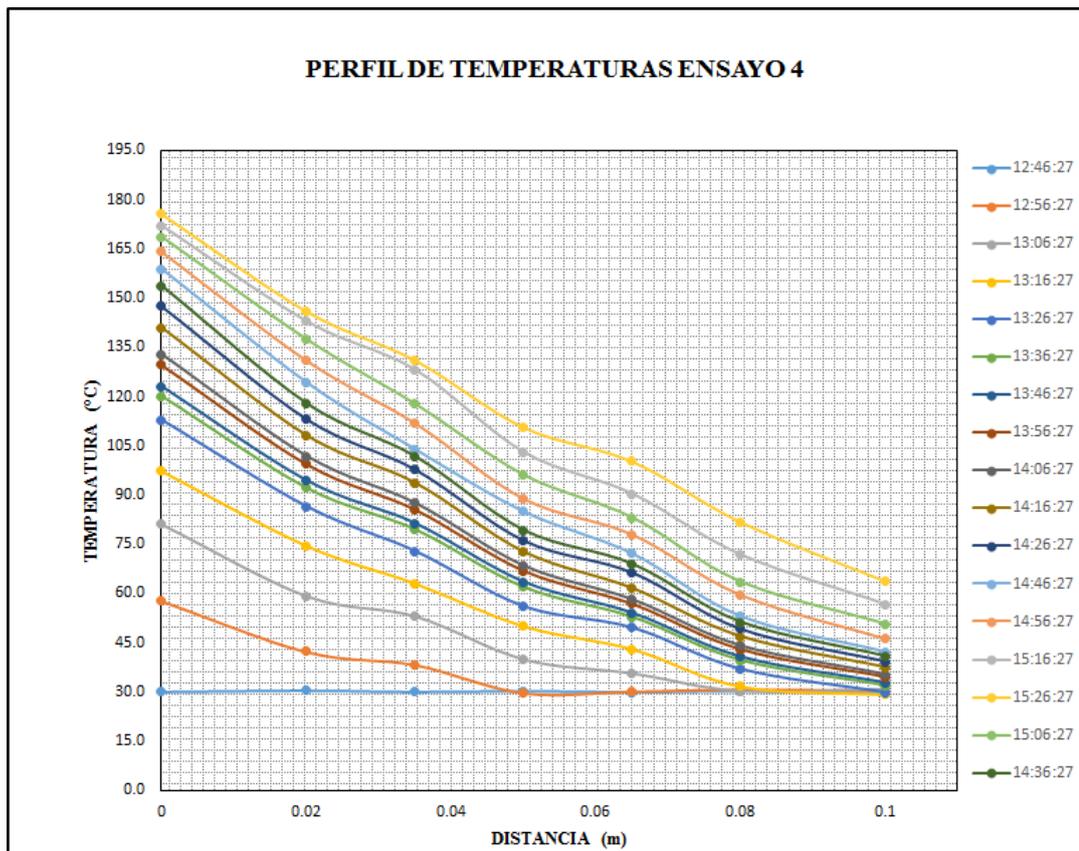


Figura 70: Perfil de Temperaturas Acero DF2 Experimento 4.

SIMULACIÓN TÉRMICA

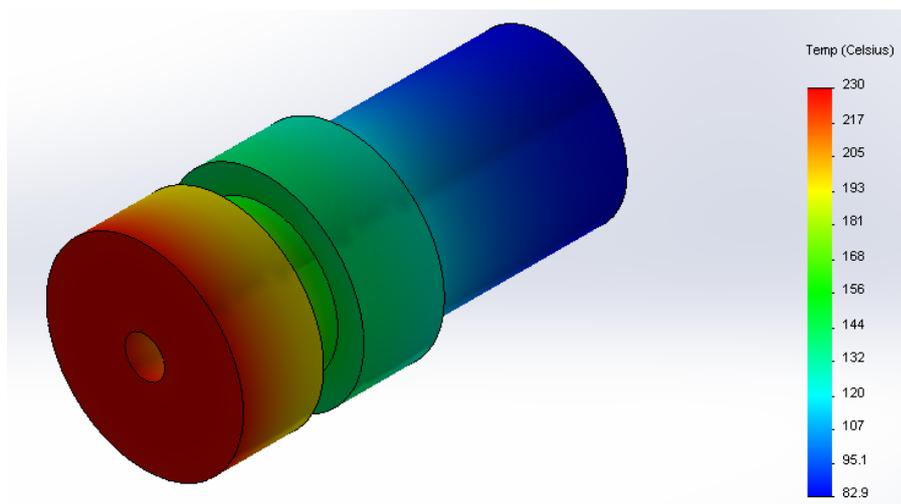


Figura 71: Simulación Térmica Acero DF2 Experimento 4.

5.1.5 EXPERIMENTO 5

FECHA: 20 de Enero del 2016.

HORA DE INICIO: 11:00 pm

HORA DE FINALIZACIÓN: 15:30 pm

TEMPERATURA (Distancia entre termocuplas 15 mm)

Tabla 64

Variables Medidas Experimento 5.

		FUERZA DE APLASTAMIENTO		REVOLUCIONES
#	TIEMPO	(Kg)	(N)	REV (rpm)
1	11:20:41	207.43	2032.814	1027
2	12:20:00	257.27	2521.246	1024
3	13:20:00	287.55	2817.99	1020
4	14:20:00	193.54	1896.692	1018
5	15:10:00	235.73	2310.154	1019
Promedio		236.304	2315.7792	1021.6
Velocidad del viento			1.49m/s	

DATOS DE TEMPERATURA DEL BRONCE

Tabla 65

Temperatura-Bronce Experimento 5.

P	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	T8(°C)	T9(°C)	Ta(°C)
1	26.2	26.4	26.3	26.4	26.3	26.5	26.3	26.4	26.3	22.0
2	40.4	42.7	39.8	39.4	37.5	36.3	35.1	31.6	31.3	23.9
3	76.9	80.4	75.9	73.9	70.1	66.2	63.1	56.9	49.1	23.1
4	99.1	102.8	98.8	96.6	92.6	88.7	85.4	77.9	69.4	22.6
5	113.4	117.6	114.6	111.9	108.4	104.9	101.9	95.3	88.1	22.6
6	130.1	132.9	128.8	128.0	124.4	120.1	116.6	108.0	102.7	22.8
7	132.4	133.2	129.5	128.9	125.1	121.3	117.9	110.7	106.3	23.1
8	133.7	134.9	130.6	129.2	126.1	122.1	118.4	114.5	109.4	23.3
9	137.9	141.3	136.4	135.5	132.1	128.8	126.4	121.2	116.0	23.3
10	145.1	149.7	145.3	141.1	137.5	134.4	132.4	128.3	124.2	23.9

CONTINUA →

P	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	T8(°C)	T9(°C)	Ta(°C)
11	153.1	156.8	153.7	149.5	146.4	143.2	139.1	134.5	131.6	24.0
12	153.1	158.5	156.4	154.5	152.4	150.2	146.8	142.1	138.5	23.2
13	158.0	163.9	163.9	162.1	160.8	157.6	153.4	149.7	144.9	22.1
14	172.1	175.7	174.2	172.4	169.6	166.8	163.5	158.3	152.8	22.0
15	180.8	184.8	183.1	181.1	178.4	176.2	172.6	168.3	166.4	22.8
16	189.0	193.1	191.3	189.7	187.5	185.2	181.5	176.0	170.5	22.7
17	196.9	201.0	199.0	197.7	195.5	193.6	190.6	184.6	182.6	23.1
18	204.3	208.7	206.2	205.1	202.6	200.3	196.6	191.8	186.1	23.4
19	211.2	215.5	213.8	212.5	209.9	207.6	204.4	199.2	197.6	22.3
20	217.8	222.2	220.2	219.0	216.1	213.5	209.8	205.1	200.2	23.8
21	223.9	227.6	225.4	224.3	222.2	220.1	216.9	211.7	209.9	23.0
22	229.7	233.8	233.2	231.3	229.2	227.0	223.8	218.4	213.8	23.2
23	234.9	238.9	236.1	235.0	232.3	229.7	226.5	221.1	219.3	22.6
24	239.8	243.9	242.3	240.6	237.6	235.2	231.9	226.5	222.8	23.6
25	244.2	248.4	247.7	245.9	243.2	240.7	237.1	231.3	229.3	22.8
26	248.2	252.4	251.6	249.9	247.1	245.0	241.1	235.9	231.9	23.8
27	251.8	256.1	254.2	252.4	249.6	247.5	243.6	238.7	236.3	23.5
28	255.0	258.7	256.7	255.3	252.7	250.6	246.7	241.3	237.8	22.8
29	257.7	261.7	260.1	258.5	256.2	253.3	249.4	244.5	242.2	23.0
30	260.0	264.1	262.3	261.2	258.3	255.7	251.8	247.6	245.2	22.6
31	261.9	266.1	264.7	262.9	260.0	257.9	254.7	249.3	247.3	22.6
32	263.4	267.9	266.4	264.5	261.6	259.3	256.1	250.1	248.2	22.2
33	264.4	268.5	266.5	265.2	263.0	260.1	256.3	252.2	250.7	23.3
34	265.0	268.6	266.7	265.6	263.5	261.0	257.6	252.8	250.5	22.5
35	265.2	268.9	267.0	265.5	263.2	260.6	257.9	251.5	250.0	22.3
36	265.0	268.7	266.4	265.1	262.2	259.9	257.4	252.7	248.3	23.5
37	264.3	268.6	266.7	265.1	262.3	260.1	257.5	253.1	248.9	22.8
38	264.8	268.6	266.7	265.3	262.5	260.1	257.5	253.2	249.7	23.3
39	264.7	269.1	267.5	265.8	262.9	260.9	258.5	253.5	251.1	23.0
40	265.1	268.7	267.2	265.5	263.0	260.7	258.4	253.9	249.9	22.3
41	265.1	269.2	267.6	266.5	263.7	261.0	258.9	255.4	250.1	23.5
42	265.3	268.9	268.3	266.4	263.4	261.0	259.2	255.8	250.2	23.6
43	265.4	269.6	268.1	266.3	263.5	261.4	259.5	256.2	251.1	22.6
44	265.6	269.2	268.7	267.2	264.9	262.5	260.7	256.6	251.6	23.2

CONTINUA →

P	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	T8(°C)	T9(°C)	Ta(°C)
45	265.7	269.8	268.5	266.8	263.8	261.2	259.3	257.1	252.1	23.1
46	265.9	270.0	269.0	267.2	264.5	262.5	260.7	257.5	252.6	22.4
47	266.0	270.1	269.7	267.9	265.4	262.8	261.0	257.9	253.2	22.4
48	265.2	270.2	270.5	268.5	266.3	263.0	261.3	258.3	253.7	22.3

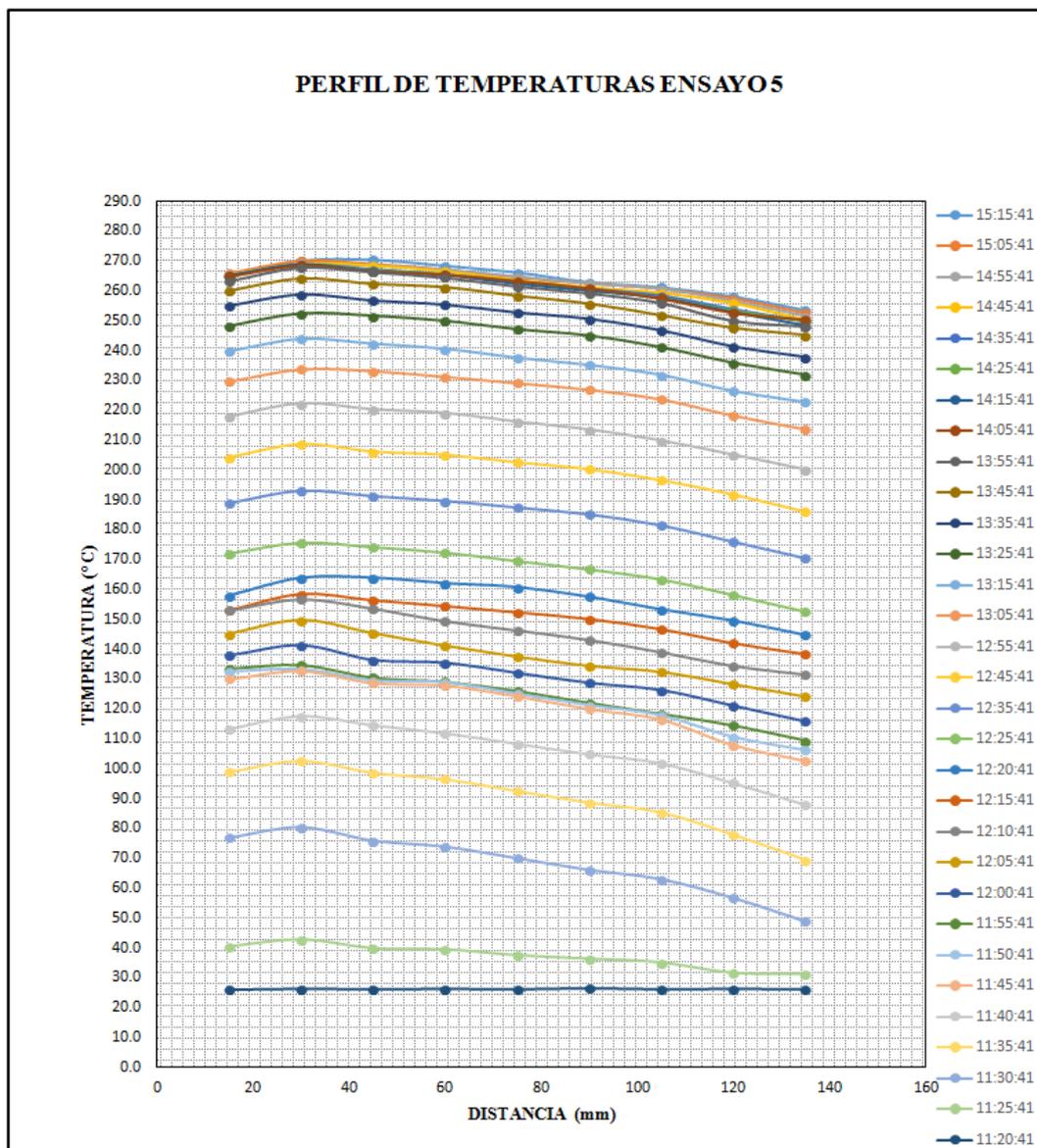


Figura 72: Perfil de Temperaturas Bronce UNS C35800 Experimento 5.

SIMULACIÓN TÉRMICA

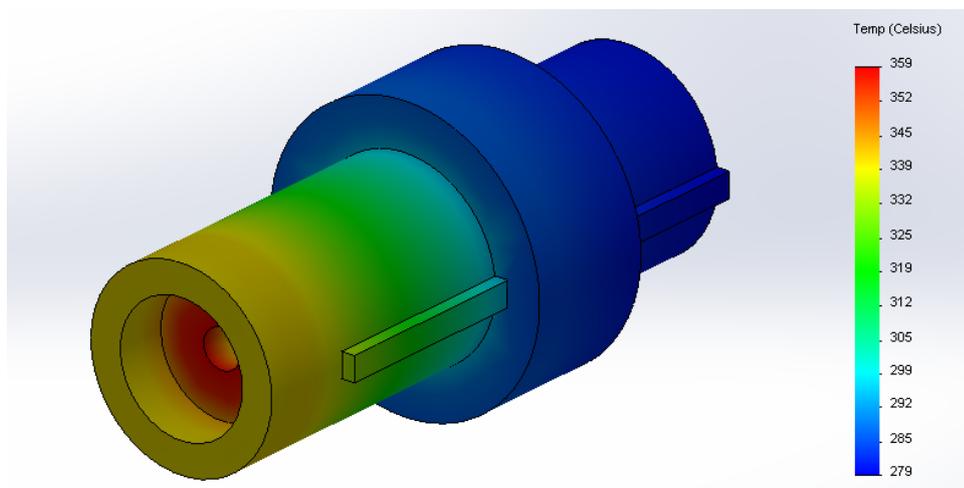


Figura 73: Simulación Térmica Bronce UNS C35800 Experimento 5

DATOS DE TEMPERATURA DEL ACERO:

Tabla 67

Temperatura-Acero Experimento 5.

P	Time	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	Ta(°C)
1	11:20:41	26.2	26.4	26.2	26.3	25.9	26.3	26.1	23.9
3	11:30:41	76.9	58.9	48.3	39.6	32.1	27.8	27.5	23.1
5	11:40:41	113.4	87.0	72.3	58.4	49.9	39.2	28.7	22.6
7	11:50:41	132.4	101.5	85.2	68.2	57.9	47.8	31.2	22.6
9	12:00:41	137.9	105.7	90.7	71.0	60.2	49.7	36.6	22.8
11	12:10:41	153.1	117.4	100.2	78.9	66.7	57.0	40.6	23.1
13	12:20:41	158.0	121.2	106.3	85.4	68.7	58.7	42.0	23.3
15	12:30:41	180.8	136.7	115.7	93.2	78.4	66.6	48.0	23.3
17	12:40:41	196.9	149.0	129.8	101.5	85.2	72.2	52.3	23.9
19	12:50:41	211.2	162.1	136.8	108.9	91.3	77.2	56.1	24.0
21	13:00:41	223.9	171.8	146.8	115.4	96.6	80.6	59.5	23.2
23	13:10:41	234.9	180.2	154.7	121.1	101.3	84.4	62.4	22.1
25	13:20:41	244.2	187.4	160.6	125.9	103.2	87.6	64.9	22.0
27	13:30:41	251.8	197.1	164.0	133.1	109.9	90.2	66.9	22.8
29	13:40:41	257.7	205.8	167.8	140.4	116.2	92.3	68.5	22.7
31	13:50:41	261.9	213.4	173.6	145.5	118.1	93.7	69.6	23.1
33	14:00:41	264.4	219.8	178.3	146.9	119.2	94.6	70.3	23.4

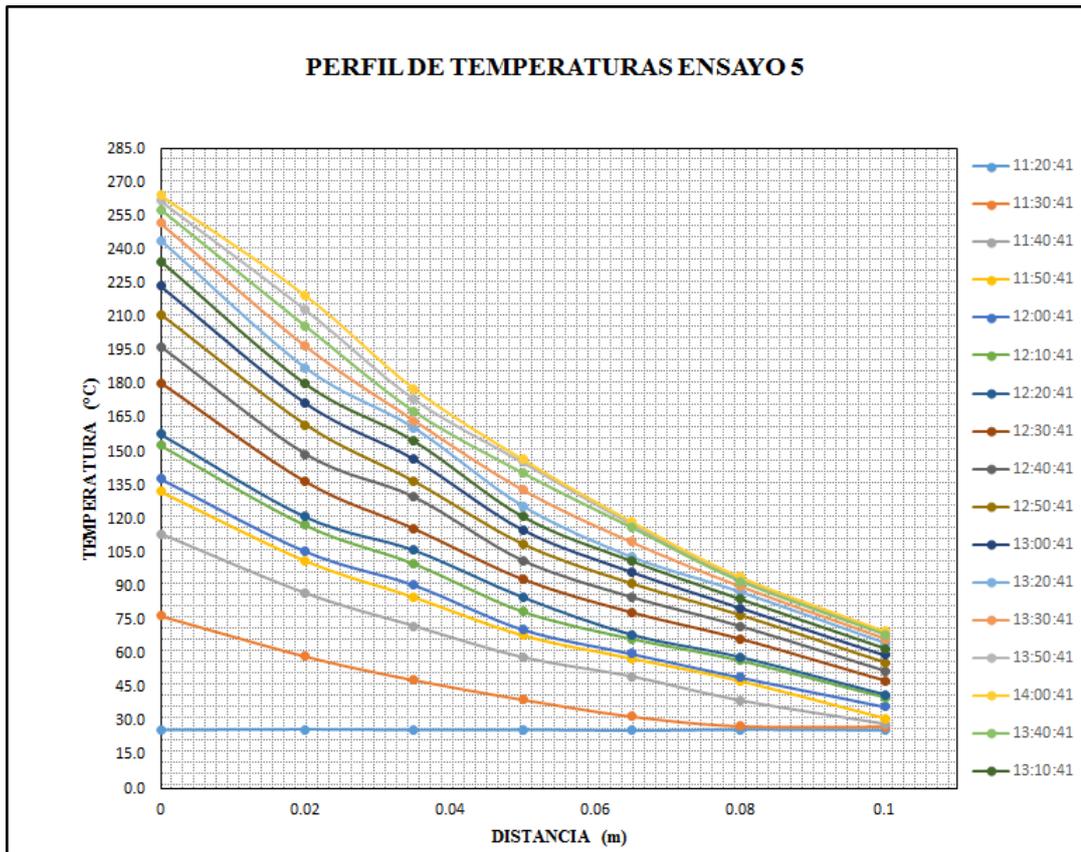


Figura 74: Perfil de Temperaturas Acero DF2 Experimento 5.

SIMULACIÓN TÉRMICA

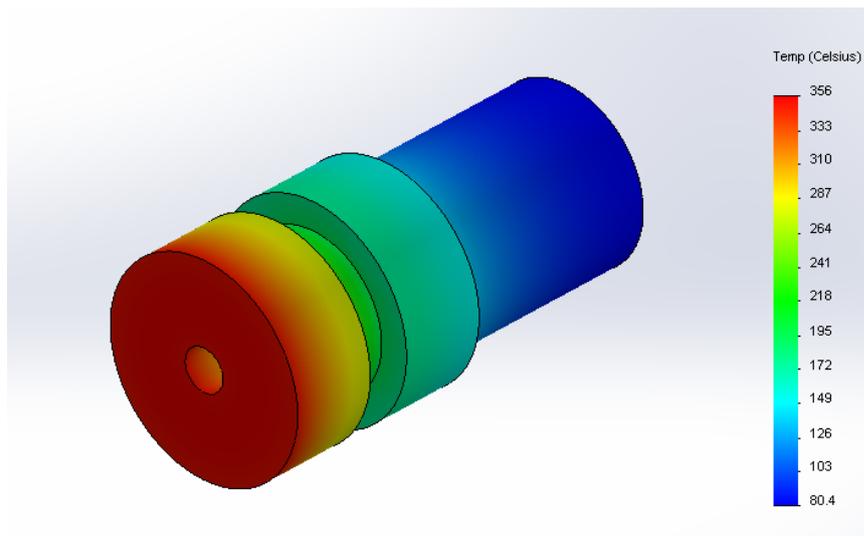


Figura 75: Simulación Térmica Acero DF2 Experimento 5.

5.1.6 EXPERIMENTO 6

FECHA: 21 de Enero del 2016.

HORA DE INICIO: 13:00 pm

HORA DE FINALIZACIÓN: 16:00 pm

TEMPERATURA (Distancia entre termocuplas 15 mm)

Tabla 69

Variables Medidas Experimento 6.

		FUERZA DE APLASTAMIENTO		REVOLUCIONES
#	TIEMPO	(Kg)	(N)	REV (rpm)
1	12:43:04	189.27	1854.85	1030
2	13:30:00	249.21	2442.26	1028
3	14:15:00	280.12	2745.18	1025
4	14:45:00	309.14	3029.57	1021
5	15:15:00	291.48	2856.50	1015
6	15:30:00	333.74	3270.65	1010
Promedio		275.49	2699.83	1021.5
Velocidad del viento		1.37m/s		

DATOS DE TEMPERATURA DEL BRONCE:

Tabla 70

Temperatura-Bronce Experimento 6.

P	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	T8(°C)	T9(°C)	Ta(°C)
1	30.4	30.4	28.9	28.9	28.2	28.0	27.8	26.6	27.4	28.2
2	55.8	55.3	52.4	51.4	49.6	46.0	46.3	42.3	39.2	27.9
3	75.6	75.1	71.6	70.5	68.2	63.2	58.8	56.1	54.3	27.6
4	92.2	91.6	87.9	87.0	84.5	78.6	71.5	68.3	67.1	28.1
5	104.2	103.7	99.8	99.3	96.7	90.7	87.8	84.2	82.4	27.9
6	116.0	115.7	111.8	111.4	108.9	106.2	103.7	98.8	94.4	28.0
7	126.4	126.2	122.1	121.9	119.5	117.0	114.2	109.2	105.1	27.8
8	136.4	136.4	132.5	132.3	130.0	127.2	124.4	119.5	115.3	27.0
9	144.5	144.6	140.6	140.7	138.6	136.5	133.0	128.6	124.2	27.9

CONTINUA →

P	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	T8(°C)	T9(°C)	Ta(°C)
10	150.7	150.9	147.2	147.3	145.4	142.7	139.8	135.2	131.5	27.0
11	154.2	154.5	151.1	151.3	149.6	147.2	144.2	139.9	136.4	26.6
12	157.8	157.9	154.2	154.3	152.7	150.4	147.6	143.5	140.3	25.9
13	161.9	161.3	157.1	157.1	155.3	152.6	150.0	145.8	142.8	26.2
14	186.4	184.8	178.9	178.2	174.5	172.1	165.9	161.6	153.2	25.7
15	195.4	193.7	187.6	187.0	183.0	180.9	174.3	169.6	161.7	26.5
16	207.7	214.2	206.0	203.5	200.3	197.6	191.9	187.6	176.1	26.8
17	199.8	202.9	198.0	196.8	196.6	194.1	189.4	184.6	179.2	25.4
18	210.0	207.8	200.8	199.7	195.1	192.2	185.0	180.7	171.5	25.0
19	215.2	213.4	206.4	205.7	200.8	198.5	190.6	186.6	176.8	26.6
20	219.9	217.2	210.6	209.1	204.4	202.0	194.5	190.2	181.0	26.7
21	224.1	221.9	215.3	214.4	209.9	207.6	201.0	196.0	187.4	25.1
22	227.8	225.9	219.7	219.0	214.8	212.1	205.3	200.3	192.5	26.9
23	231.0	228.9	222.6	221.1	216.8	214.6	207.1	202.5	193.4	25.5
24	233.7	231.2	224.6	223.9	219.6	217.2	210.3	205.7	197.3	25.6
25	235.9	234.1	227.9	226.9	221.9	219.9	211.6	207.3	198.5	25.6
26	237.6	235.6	228.9	227.5	223.2	220.5	212.9	208.7	199.8	26.4
27	238.8	236.5	229.8	228.9	224.1	221.3	214.2	209.5	201.1	26.3
28	239.5	237.0	230.8	228.8	225.0	221.8	215.5	211.3	202.4	26.2
29	240.5	237.8	231.7	229.7	225.9	222.6	216.8	212.5	204.6	25.3
30	241.5	238.5	232.7	230.4	226.8	223.5	218.1	213.9	205.9	26.2
31	242.4	239.2	233.6	231.0	227.7	224.3	219.4	215.2	207.2	26.8
32	243.4	239.9	234.6	231.7	228.6	225.1	220.7	216.5	208.4	25.0
33	244.3	240.6	235.5	232.3	229.5	226.0	222.0	217.9	209.7	25.6
34	245.3	241.3	236.5	233.0	230.4	226.8	223.3	219.2	211.0	26.5
35	246.2	242.0	237.4	233.6	231.3	227.6	224.6	220.6	211.2	26.8
36	247.2	242.7	238.4	234.3	232.2	228.5	225.9	221.9	213.5	25.8
37	248.1	243.4	239.3	235.9	233.1	229.3	226.8	223.2	216.8	26.8
38	249.1	244.1	240.3	236.6	234.0	230.1	228.5	224.6	218.1	26.0
39	250.0	244.8	241.2	237.2	234.9	231.0	229.8	225.9	219.9	25.5
40	251.0	245.5	242.2	238.9	235.8	232.8	230.1	227.3	221.6	26.9

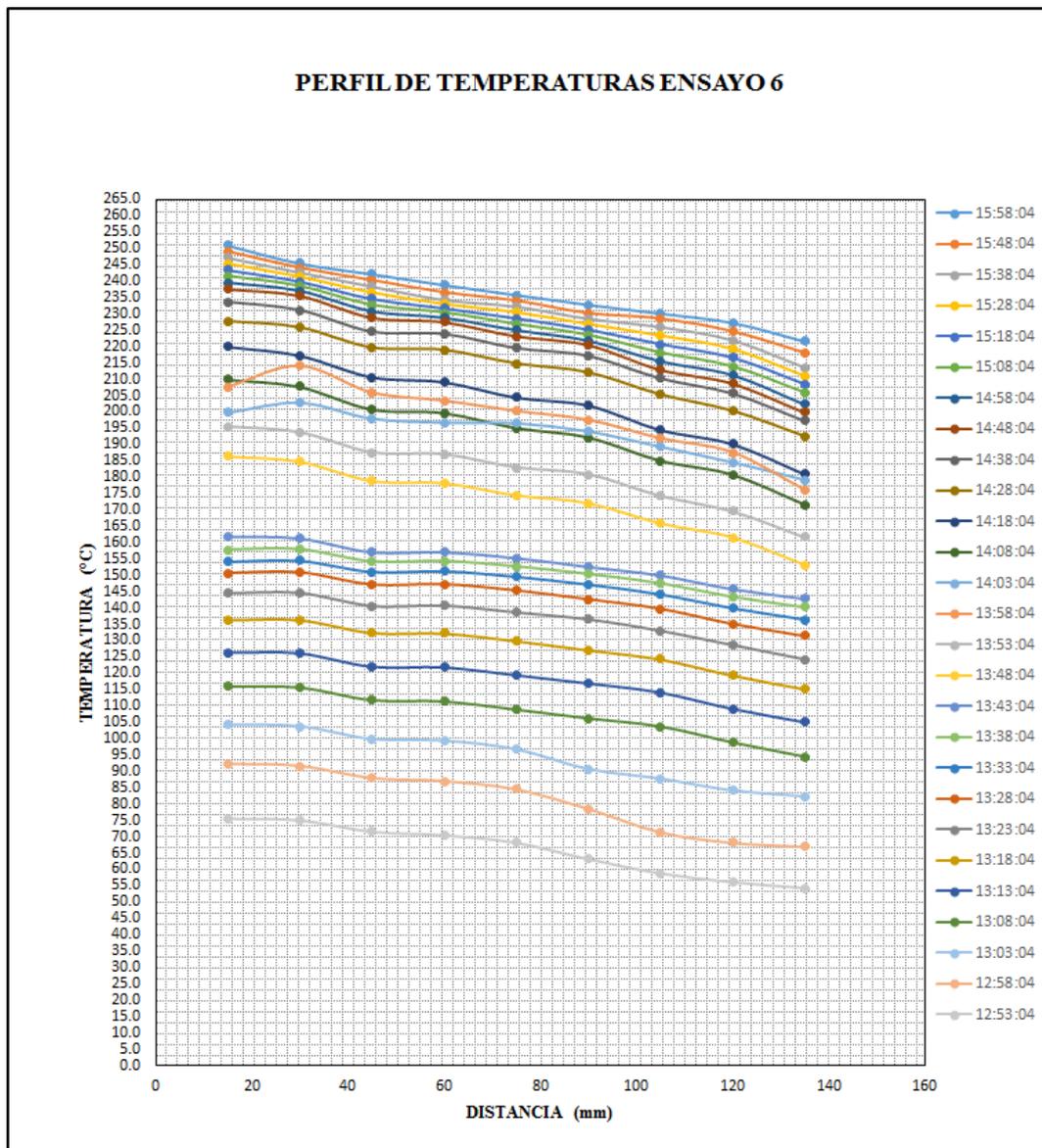


Figura 76: Perfil de Temperaturas Bronce UNS C35800 Experimento 6.

SIMULACIÓN TÉRMICA

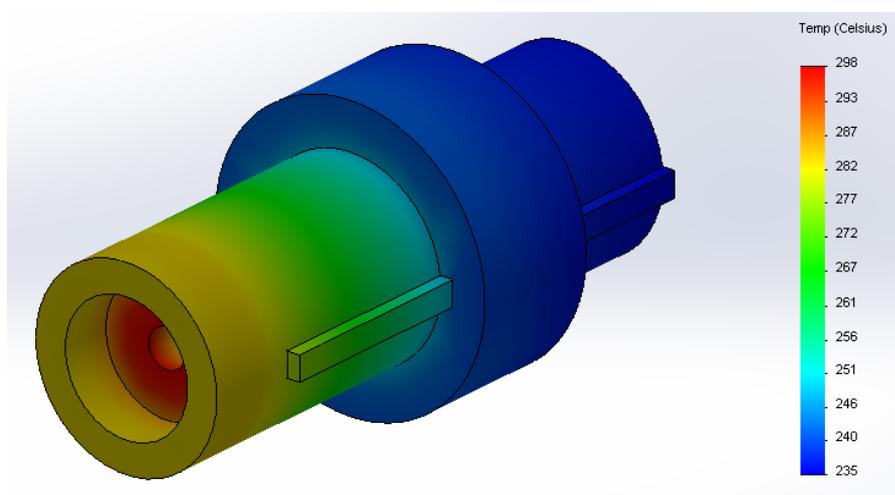


Figura 77: Simulación Térmica Bronce UNS C35800 Experimento 6.

DATOS DE TEMPERATURA DEL ACERO:

Tabla 72

Temperatura-Acero Experimento 6.

P	Time	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	Ta(°C)
1	12:43:04	30.4	26.4	26.2	26.3	25.9	26.3	26.1	28.2
3	12:53:04	75.6	58.0	47.5	38.9	31.1	29.8	26.5	27.9
5	13:03:04	104.2	79.9	61.5	50.7	46.0	36.1	28.7	27.6
7	13:13:04	126.4	96.9	77.4	65.1	55.4	41.7	31.2	28.1
9	13:23:04	144.5	110.8	86.8	74.4	63.0	48.0	38.4	27.9
11	13:33:04	154.2	118.3	92.9	79.4	67.1	51.4	40.9	28.0
13	13:43:04	161.9	127.2	101.8	85.4	70.4	54.0	43.0	27.8
15	13:53:04	195.4	146.9	116.8	96.7	79.5	62.6	47.9	27.0
17	14:03:04	199.8	153.2	121.6	103.0	86.4	67.2	53.1	27.9
19	14:13:04	215.2	165.1	131.3	110.9	92.9	72.5	57.2	27.0
21	14:23:04	224.1	171.9	136.9	115.5	96.7	75.6	59.5	26.6
23	14:33:04	231.0	177.2	141.3	119.1	99.6	78.0	61.4	25.9
25	14:43:04	235.9	181.0	144.4	121.6	101.7	79.7	62.7	26.2
27	14:53:04	238.8	183.2	146.2	123.1	102.9	80.7	63.4	25.7
29	15:03:04	240.5	184.9	147.7	123.6	103.3	81.0	63.7	26.5
31	15:13:04	242.4	185.1	149.9	124.6	103.8	82.6	64.4	26.8
33	15:23:04	244.3	186.1	153.3	126.3	104.3	86.2	67.1	25.4

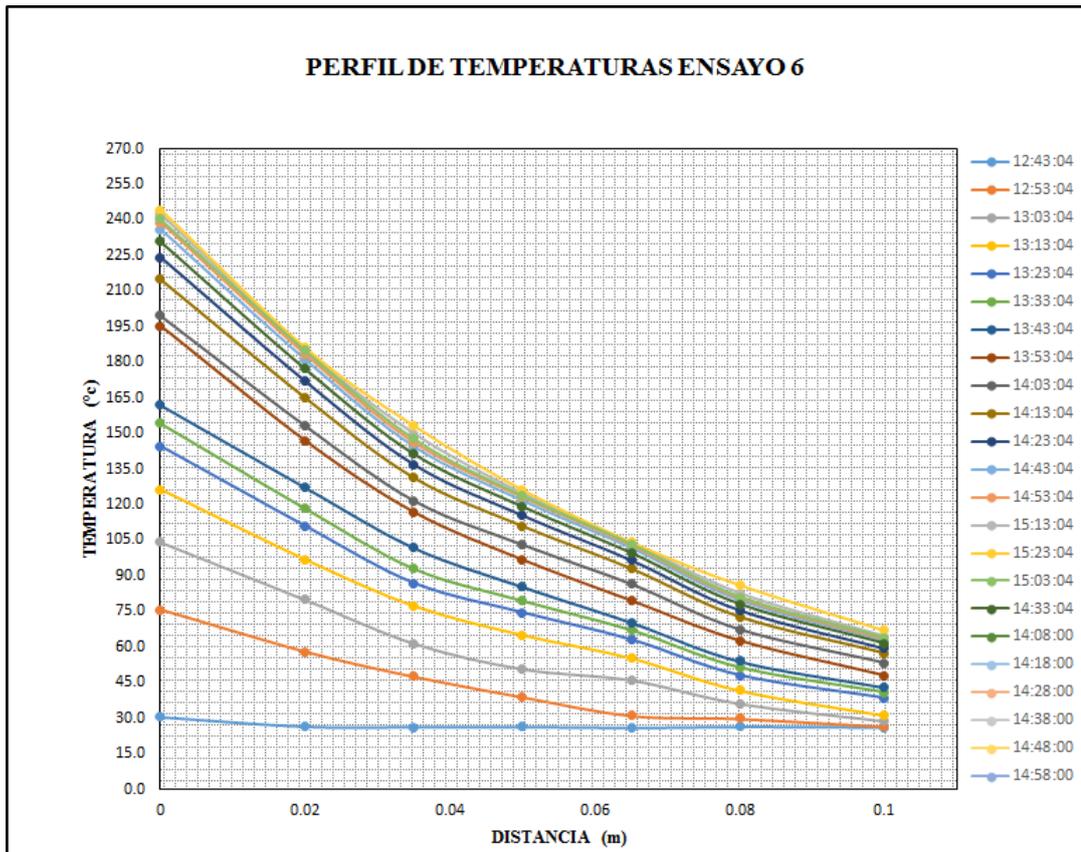


Figura 78: Perfil de Temperaturas Acero DF2 Experimento 6.

SIMULACIÓN TÉRMICA

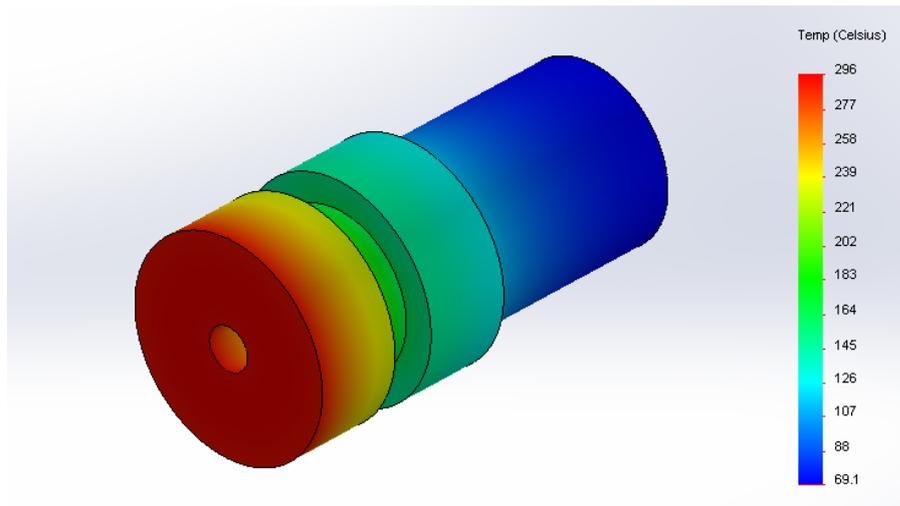


Figura 79: Simulación Térmica Acero DF2 Experimento 6.

5.1.7 EXPERIMENTO 7

FECHA: 28 de Enero del 2016.

HORA DE INICIO: 11:10 pm

HORA DE FINALIZACIÓN: 14:10 pm

TEMPERATURA (Distancia entre termocuplas 15 mm)

Tabla 74

VARIABLES MEDIDAS EXPERIMENTO 7.

		FUERZA DE APLASTAMIENTO		REVOLUCIONES
#	TIEMPO	(Kg)	(N)	REV (rpm)
1	11:16:42	211	2067.8	516
2	12:00:00	253	2479.4	516
3	12:40:00	309	3028.2	514
4	13:10:00	333	3263.4	510
5	13:30:00	430	4214	508
6	13:45:00	453	4439.4	502
Promedio		331.5	3248.7	511
Velocidad del viento		1.57m/s		

DATOS DE TEMPERATURA DEL BRONCE:

Tabla 75

Temperatura-Bronce Experimento 7.

P	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	T8(°C)	T9(°C)	Ta(°C)
1	25.5	25.8	25.5	25.7	25.5	25.8	25.4	25.6	25	29.1
2	57.9	57.5	53.9	52.2	47.4	47.3	45.9	28	26.4	29.7
3	116.3	115.5	109.7	106.5	96.1	89.9	81.2	62.6	44.3	29.9
4	172.9	172.3	164.7	158	147.5	142.1	135.8	111.3	85.4	30.1
5	174.3	174.2	167.5	163.7	153	149.6	142.6	133.2	116	30.2
6	182.5	183.4	176.6	172.6	162.8	159.6	153.5	147.8	132.9	30.6
7	194.1	194.9	188.6	184.9	173.8	170.1	163.5	160.8	146.8	30.9
8	203.4	204.4	198.1	194.9	183.1	180	174	171.5	157.5	31.3
9	209.7	211.1	205	201.9	190.1	186.2	179.3	175.6	167	31.6

CONTINUA →

P	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	T8(°C)	T9(°C)	Ta(°C)
10	216.3	218.1	211.2	207.2	197.1	193.8	187.2	183.7	174.5	32.1
11	222.2	223.6	217.5	213.9	202.9	199.3	193.2	189.8	180.9	32.4
12	223.9	225.3	219.1	216	204.8	200.8	194.7	191.1	185.2	33
13	223.1	224.7	219	215.6	208.2	204.4	198.3	194.6	187.3	31
14	225.8	227.4	221.6	218.2	211.6	207.7	200.8	196.8	188.1	32
15	227.4	228.9	223.1	219.7	213.3	209.7	203.7	200.3	191.1	31.9
16	238.2	240.3	233.7	230.3	222.1	218.5	211.7	207.7	193	31.2
17	458.8	460.1	442.6	431.3	411.4	388.1	361.6	310.4	217.6	31.3
18	568.7	573	564.4	557.2	515.6	499.5	486	439.2	326.4	32
19	573.1	578.5	570.8	567	522	508.1	498.6	484.4	395.1	32.7
20	574.2	579.3	573.5	568.2	534.3	531	524.7	512	476	31.9
21	575.5	579.5	577.3	574.4	556.1	552.1	545.8	532.6	498.5	31.1
22	576.7	579.5	577.5	576.4	566.3	562.5	555.5	548.1	506.3	31.8
23	577.2	579.4	577.3	576.2	571	567.5	561.2	541.5	515.7	31.1
24	576.8	578.3	575.9	575.9	570.1	566.8	560.5	541.5	521.1	31.3
25	571.7	576.4	573.4	573.4	568.7	564.9	557.9	540	519.5	31.4
26	568.7	572.8	570	567.7	561.7	558.4	552.3	538.1	517.3	29.0
27	565.8	570.3	567.5	563.9	559.2	555.8	548.9	535.3	515.5	29.5
28	563.3	567.5	565.1	557.9	551	547.3	541	531.6	512.5	29.1
29	560.6	564.7	562.3	552.7	547.4	544.4	537.7	528.6	509.1	29.0
30	557.8	561.9	559.5	547.4	543.1	539.9	533.3	524.3	504.3	29.6
31	554.4	559.2	556.4	544.9	538.3	535.1	528.3	519.5	499.9	29.0

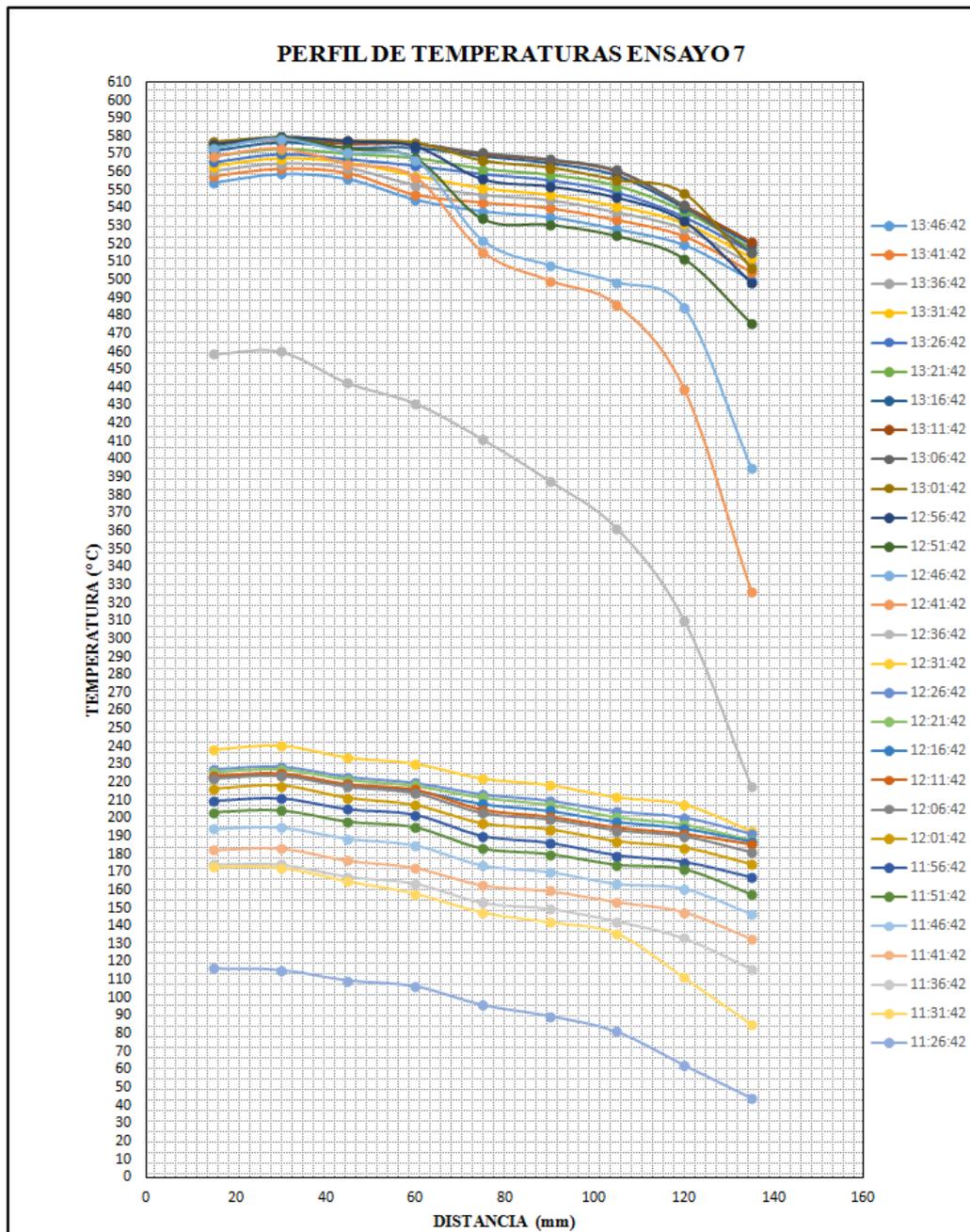


Figura 80: Perfil de Temperaturas Bronce UNS C35800 Experimento 7.

SIMULACIÓN TÉRMICA

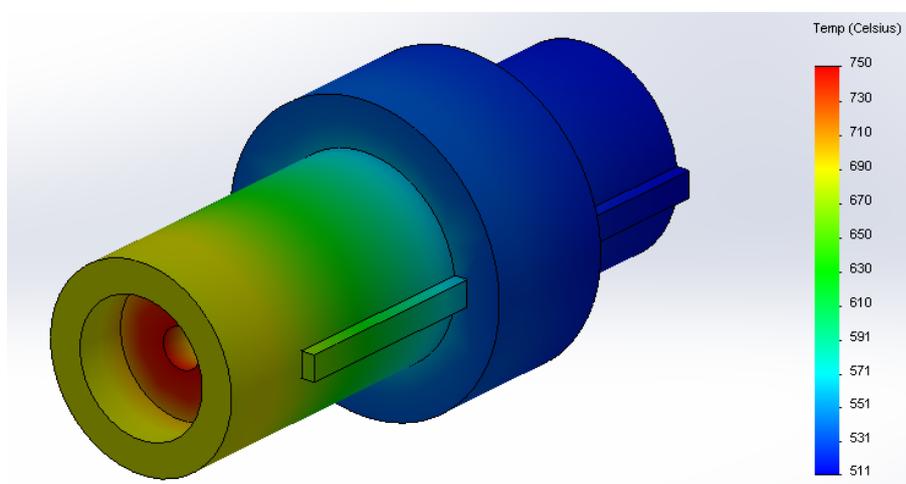


Figura 81: Simulación Térmica Bronce UNS C35800 Experimento 7.

DATOS DE TEMPERATURA DEL ACERO:

Tabla 77

Temperatura-Acero Experimento 7.

P	Time	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	Ta(°C)
1	11:16:42	25.5	26.4	26.2	26.3	25.9	26.3	26.1	29.1
3	11:26:42	116.3	89.2	69.1	59.9	45.1	44.8	29.5	29.7
5	11:36:42	174.3	133.7	105.6	89.8	71.6	57.3	34.7	29.9
7	11:46:42	194.1	148.9	124.0	100.0	84.0	65.2	39.2	30.1
9	11:56:42	209.7	160.8	134.8	108.1	90.6	70.6	55.7	30.2
11	12:06:42	222.2	170.4	143.7	114.5	95.9	74.9	59.0	30.6
13	12:16:42	223.1	171.1	142.3	115.0	96.2	75.2	59.3	30.9
15	12:26:42	227.4	174.4	148.0	117.2	98.1	76.7	60.4	31.3
17	12:36:42	458.8	351.9	297.5	236.5	197.9	156.9	121.9	31.6
19	12:46:42	573.1	439.6	369.4	295.4	244.2	196.5	152.3	32.1
21	12:56:42	575.5	450.5	374.8	311.9	259.6	216.0	169.0	32.4
23	13:06:42	577.2	460.9	389.3	328.8	277.8	234.6	187.3	33
25	13:16:42	571.7	475.2	413.6	360.0	313.4	272.8	226.7	31
27	13:26:42	565.8	479.8	423.9	374.6	331.0	292.4	247.9	32
29	13:36:42	560.6	485.0	435.0	390.1	349.9	313.9	271.5	31.9
31	13:46:42	554.4	479.5	430.1	385.8	346.0	310.4	268.5	31.2
33	13:46:42	554.4	489.2	445.4	405.6	369.3	336.2	296.7	31.3

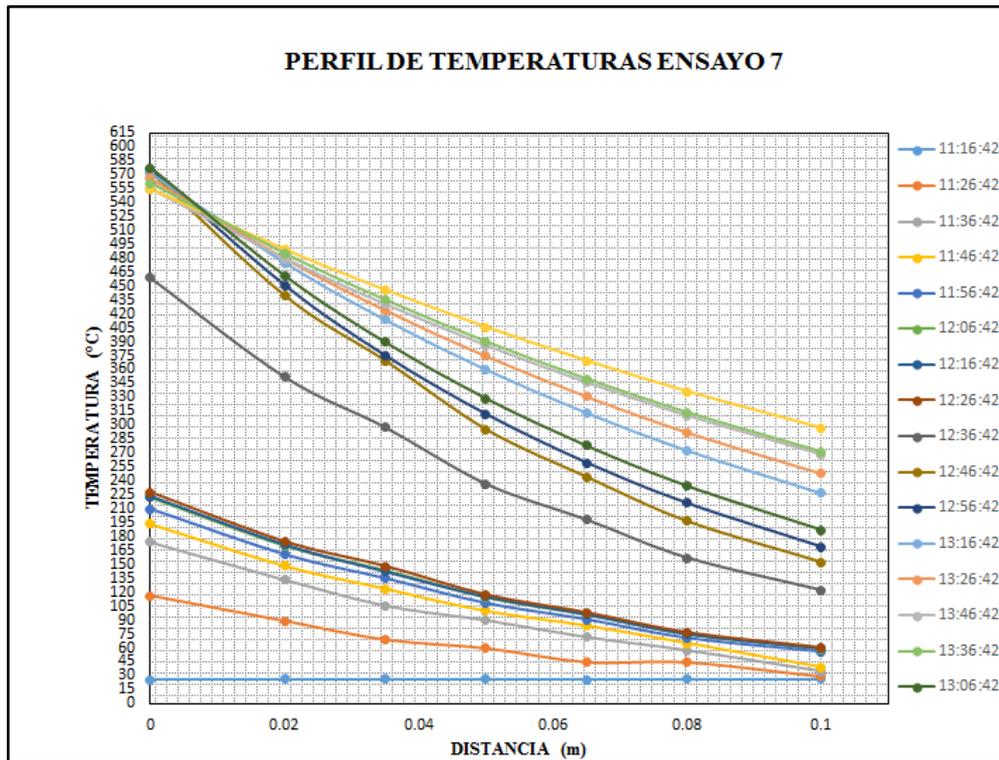


Figura 82: Perfil de Temperaturas Acero DF2 Experimento 7.

SIMULACIÓN TÉRMICA

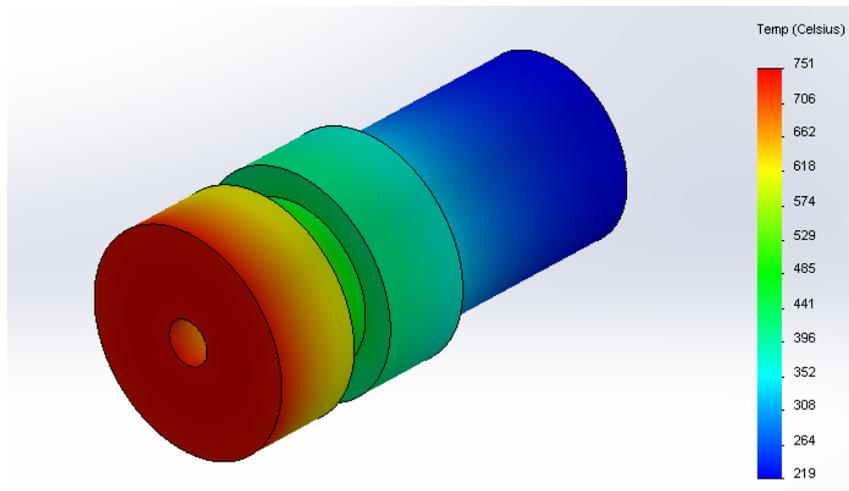


Figura 83: Simulación Térmica Acero DF2 Experimento 7.

5.1.8 EXPERIMENTO 8

FECHA: 29 de Enero del 2016.

HORA DE INICIO: 11:10 pm

HORA DE FINALIZACIÓN: 15:10 pm

TEMPERATURA (Distancia entre termocuplas 15 mm)

Tabla 79

Variables Medidas Experimento 8.

FUERZA DE APLASTAMIENTO		REVOLUCIONES		
#	TIEMPO	(Kg)	(N)	REV (rpm)
1	12:35:00	180	1764	516
2	12:55:00	205	2009	516
3	13:15:00	244	2391.2	516
4	13:45:00	303	2969.4	513
5	14:05:00	428	4194.4	511
6	14:10:00	428	4194.4	509
Promedio		119.245	298	513.5
Velocidad del viento		1.6m/s		

DATOS DE TEMPERATURA DEL BRONCE:

Tabla 80

Temperatura-Bronce Experimento 8.

P	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	T8(°C)	T9(°C)	Ta(°C)
1	25.2	25.5	25.2	25.5	25.3	25.5	25.2	25.3	25	24
2	68.7	65.2	67.5	61.7	60.2	56.1	53.9	43.2	38.3	23.9
3	105.1	100.7	103.8	95.7	93.7	87.9	84.7	75.5	52.8	24.3
4	125.9	121.5	125.1	116.6	115.1	109.4	106.2	96.4	75.4	24.8
5	140.5	136.0	140.7	131.5	129.9	124.9	121.8	112.1	94.1	24.7
6	154.9	149.9	155.4	145.8	144.7	139.7	136.7	126.9	110.8	24.8
7	162.0	157.2	162.8	153.6	152.9	148.6	145.9	136.5	124.0	24.7
8	185.4	181.0	188.1	176.0	175.8	169.6	165.9	156.8	137.4	25.0
9	359.3	332.2	329.5	312.6	308.3	284.7	272.8	263.1	242.8	25.1
10	466.3	461.2	459.3	447.0	442.4	420.1	403.2	391.0	382.4	25.4
11	593.9	591.5	590.9	582.5	561.4	544.8	524.2	483.8	450.5	26.3
12	545.1	574.5	582.6	553.1	552.1	543.6	528.5	487.6	480.5	25.8
13	538.7	564.6	573.5	547.6	543.3	541.0	527.9	498.9	492.0	25.8
14	524.0	549.3	560.2	539.5	533.6	530.3	529.5	509.8	502.4	25.4
15	511.4	535.3	548.0	532.0	527.8	525.6	525.1	515.2	506.4	25.1

CONTINUA →

P	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	T8(°C)	T9(°C)	Ta(°C)											
16	498.8	521.4	535.8	524.6	521.0	518.7	514.4	509.0	499.7	25.5											
17	486.2	507.4	523.6	517.1	513.3	510.6	506.9	501.7	491.8	25.3											
18	473.6	493.5	511.4	509.7	504.7	501.8	497.9	492.5	484.0	25.3											
19	461.0	479.5	498.6	495.5	495.2	492.5	488.9	482.7	473.9	25.2											
20	448.4	465.6	487.0	483.4	484.8	482.0	479.0	472.0	464.2	25.6											
21	448.8	465.9	484.8	481.0	473.5	470.5	466.4	461.2	452.4	25.7											
22	440.5	452.4	462.6	458.9	461.3	458.7	455.1	449.1	439.8	25.5											
23	434.4	448.1	450.4	446.6	448.2	445.4	442.4	435.0	426.3	25.8	24	428.2	432.5	437.2	433.4	434.1	431.4	427.6	422.0	412.7	25.4
24	428.2	432.5	437.2	433.4	434.1	431.4	427.6	422.0	412.7	25.4											

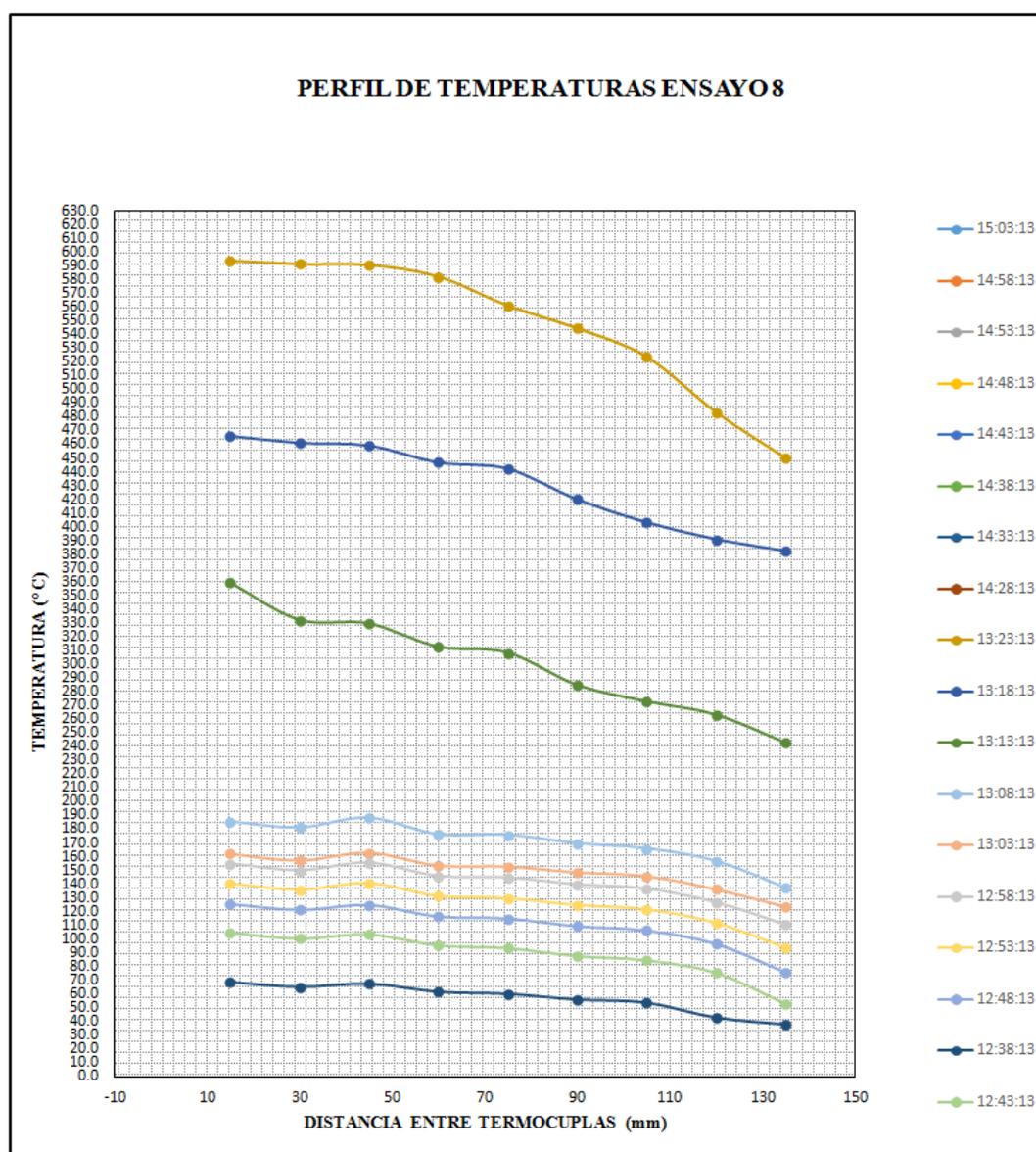


Figura 84: Perfil de Temperaturas Bronce UNS C35800 Experimento 8.

SIMULACIÓN TÉRMICA

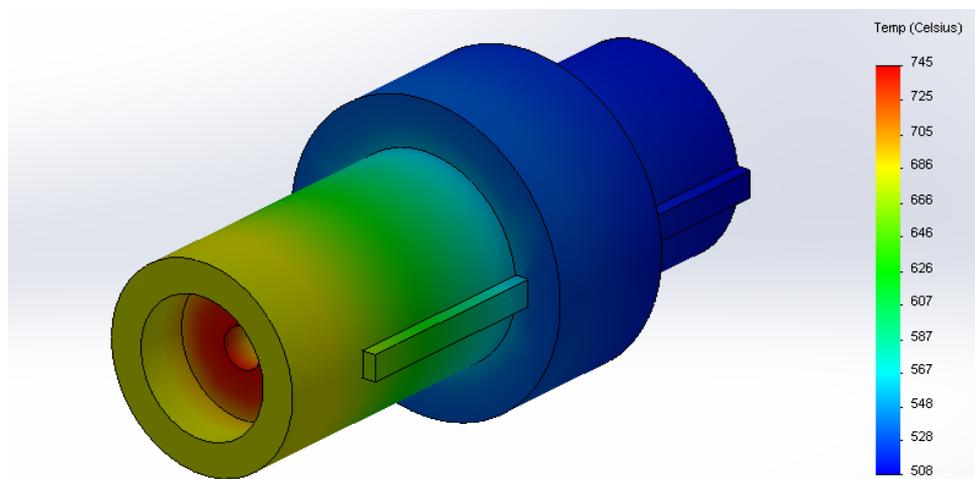


Figura 85: Simulación Térmica Bronce UNS C35800 Experimento 8.

DATOS DE TEMPERATURA DEL ACERO:

Tabla 82

Temperatura-Acero Experimento 8.

P	Time	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	Ta(°C)
1	12:33:13	25.2	25.4	25.2	25.3	25.9	25.3	25.1	24
2	12:38:13	68.7	52.7	39.2	35.4	32.1	27.8	26.5	23.9
3	12:43:13	105.1	80.6	62.0	54.1	46.4	36.4	28.7	24.3
4	12:48:13	125.9	96.5	75.1	64.9	55.2	41.6	31.2	24.8
5	12:53:13	140.5	107.7	84.3	72.4	61.3	46.6	37.3	24.7
6	12:58:13	154.9	118.8	93.4	79.8	67.4	51.6	41.1	24.8
7	13:03:13	162.0	124.2	97.8	83.5	70.4	54.1	43.0	24.7
8	13:08:13	185.4	142.2	112.6	95.5	80.3	62.2	49.2	25.0
9	13:13:13	359.3	275.6	229.9	185.2	153.8	122.4	95.5	25.1
10	13:18:13	466.3	357.7	302.2	240.4	199.0	159.5	123.9	25.4
11	13:23:13	593.9	464.8	386.8	321.8	267.8	222.8	174.4	26.3
12	13:28:13	545.1	435.2	367.6	310.5	262.3	221.6	176.9	25.8
13	13:33:13	538.7	447.7	389.7	339.2	295.2	257.0	213.6	25.8
14	13:38:13	524.0	444.3	392.6	346.9	306.5	270.8	229.6	25.4
15	13:43:13	511.4	442.4	396.8	355.9	319.2	286.3	247.6	25.1
16	13:48:13	498.8	431.5	387.0	347.1	311.3	279.2	241.5	25.5

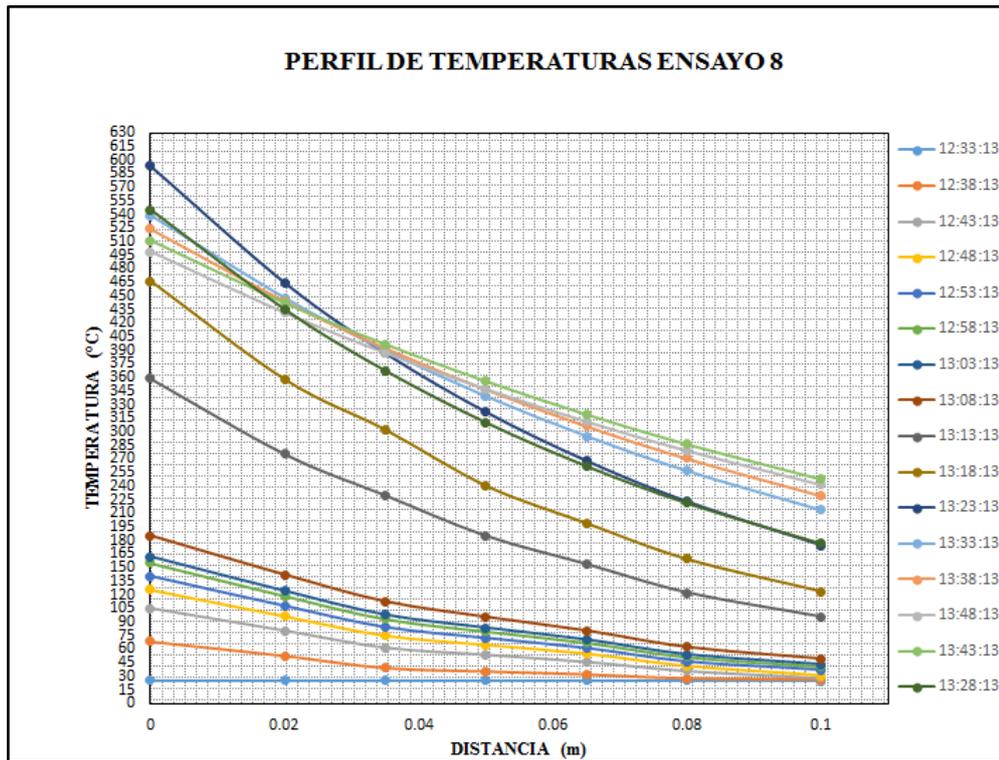


Figura 86: Perfil de Temperaturas Acero DF2 Experimento 8.

SIMULACIÓN TÉRMICA

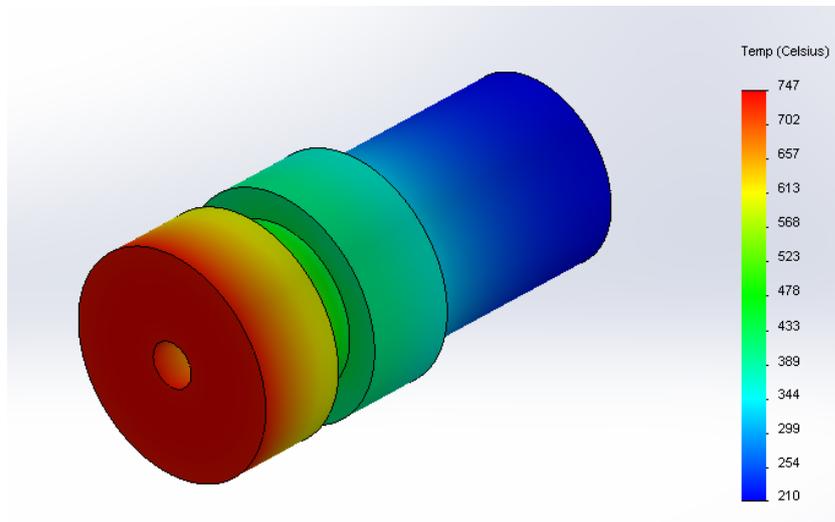


Figura 87: Simulación Térmica Acero DF2 Experimento 8.

5.1.9 EXPERIMENTO 9

FECHA: 2 de Febrero del 2016.

HORA DE INICIO: 10:15 pm

HORA DE FINALIZACIÓN: 14:30 pm

TEMPERATURA (Distancia entre termocuplas 15 mm)

Tabla 84

Variables Medidas Experimento 9.

		FUERZA DE APLASTAMIENTO		REVOLUCIONES
#	TIEMPO	(Kg)	(N)	REV (rpm)
1	10:33:57	96.84	949.03	1030
2	11:38:57	135.72	1330.06	1029
3	12:08:57	148.48	1455.10	1029
4	12:53:57	151.25	1482.25	1028
5	13:53:57	165.67	1623.57	1028
Promedio		139.59	1368	1028.8
Velocidad del viento			1.61 ^m /s	

DATOS DE TEMPERATURA DEL BRONCE:

Tabla 85

Temperatura-Bronce Experimento 9.

P	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	T8(°C)	T9(°C)	Ta(°C)
1	25.5	25.4	25.4	25.7	25.3	24.9	25.5	25.4	25.4	25.6
2	51.7	50.6	47.7	46.4	45.4	41.6	41.3	38.1	35.0	25.8
3	71.2	70.7	67.3	65.9	63.4	58.7	53.8	51.8	50.2	24.6
4	87.3	87.1	83.3	82.6	79.9	73.7	66.7	63.6	62.4	24.0
5	99.8	98.8	94.8	94.5	92.4	86.6	83.5	79.5	77.5	24.5
6	111.1	111.3	107.1	106.8	104.4	101.3	99.1	94.4	89.6	25.7
7	122.2	121.5	117.1	117.2	114.8	112.3	110.0	104.2	100.4	24.2
8	131.5	132.2	127.9	127.3	125.5	122.3	120.1	114.7	110.6	24.5
9	139.5	140.3	135.7	136.0	134.2	131.8	128.7	123.7	119.8	25.1
10	146.4	146.1	142.3	142.7	141.3	138.2	135.3	130.2	127.4	24.4

CONTINUA →

P	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	T8(°C)	T9(°C)	Ta(°C)
11	149.6	149.7	146.1	147.1	145.4	142.3	139.9	135.3	132.1	23.2
12	153.6	153.6	150.0	149.9	147.8	146.0	143.2	139.1	135.7	23.9
13	157.2	156.3	152.2	152.1	150.6	147.7	145.8	141.3	138.1	23.4
14	166.0	163.7	158.3	156.4	154.3	152.4	148.3	144.5	141.6	24.4
15	174.8	171.0	166.5	165.6	162.0	156.1	152.9	149.7	144.9	24.7
16	181.4	180.1	174.8	173.6	169.7	167.2	161.2	157.1	148.7	23.5
17	190.9	188.7	183.4	182.6	178.9	176.2	169.3	165.4	156.7	23.8
18	195.5	196.2	193.7	188.3	183.8	180.5	174.6	171.4	163.4	25.3
19	203.1	203.1	196.6	192.9	190.2	187.2	182.9	176.5	169.2	24.1
20	205.5	205.3	201.7	197.4	193.5	190.7	184.4	179.7	172.7	25.2
21	210.5	208.9	202.1	201.0	197.9	193.8	187.1	182.3	174.8	25.0
22	213.8	212.8	206.3	204.1	199.9	196.8	189.7	185.3	177.1	23.9
23	216.5	213.4	207.6	205.1	200.9	198.7	190.5	186.3	179.5	24.8
24	217.3	215.7	209.4	207.1	202.9	200.7	193.4	189.3	182.8	25.3
25	219.7	217.1	211.2	209.6	204.9	203.3	196.0	192.3	183.2	24.5
26	223.2	221.1	215.5	212.6	208.5	206.5	199.1	195.9	188.2	24.0
27	226.5	224.1	218.3	216.1	212.2	210.2	202.5	197.7	188.5	24.3
28	229.3	226.6	220.1	219.1	215.2	212.5	205.3	201.6	192.7	24.0
29	231.1	229.7	223.3	222.6	217.0	215.3	206.7	202.9	194.4	25.1
30	233.5	230.7	224.2	223.1	218.2	216.0	208.0	204.1	195.6	24.0
31	233.8	232.3	225.2	224.0	219.7	216.7	209.3	204.5	197.0	24.1
32	235.4	232.9	226.4	224.9	220.1	217.7	210.8	206.9	198.2	23.6
33	236.3	233.3	227.1	225.8	221.1	218.1	212.0	208.0	200.5	24.6
34	237.2	234.0	227.7	226.3	222.0	219.4	213.4	209.1	201.5	24.3
35	237.7	234.5	229.4	226.9	223.3	219.8	215.3	210.8	202.7	24.6
36	238.5	235.5	230.0	227.2	224.1	220.2	216.2	211.7	204.1	24.8
37	239.8	236.1	231.0	227.3	224.6	221.1	217.3	213.5	205.6	24.5
38	241.2	236.6	232.1	228.6	225.6	222.0	218.6	214.8	206.4	23.1
39	241.9	237.3	233.2	229.4	226.7	223.4	219.8	215.8	206.8	24.0
40	242.4	237.6	233.8	230.0	227.3	223.4	220.9	217.2	209.3	23.8
41	243.5	238.8	234.3	231.8	228.7	225.0	222.5	219.0	212.1	23.7
42	244.1	239.3	235.8	232.4	229.3	225.8	224.2	220.3	213.2	24.1
43	244.6	240.0	236.5	232.7	230.4	226.3	225.3	221.0	215.0	25.7
44	244.7	241.1	237.2	234.6	231.1	228.6	225.4	222.5	217.4	25.3

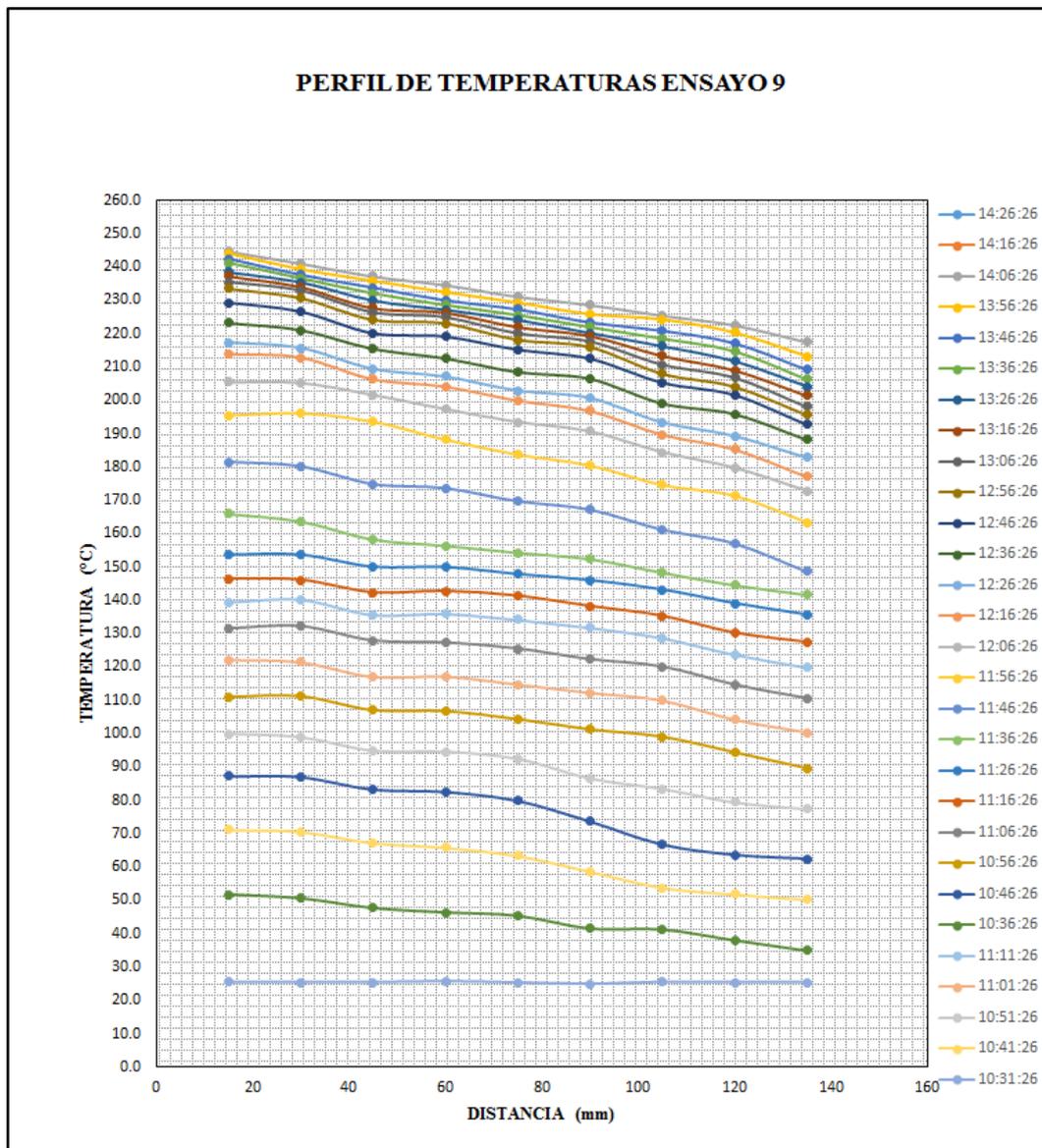


Figura 88: Perfil de Temperaturas Bronce UNS C35800 Experimento 9.

SIMULACIÓN TÉRMICA

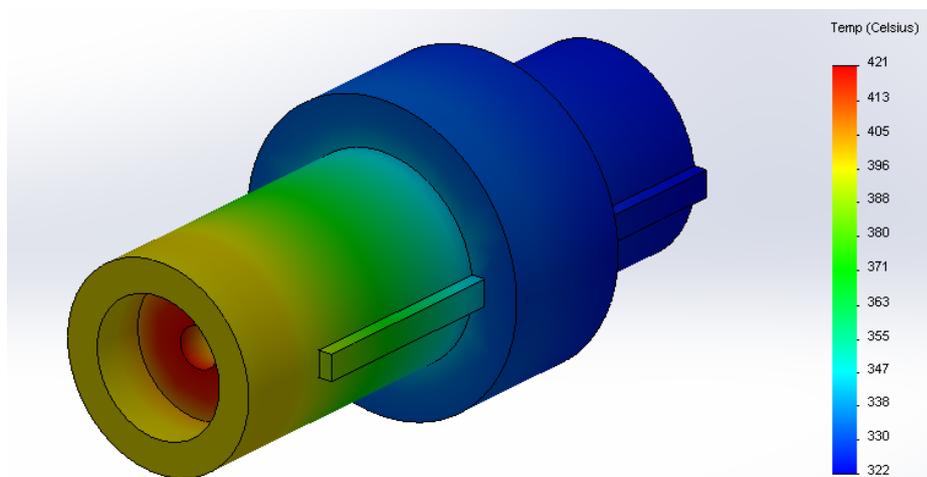


Figura 89: Simulación Térmica Bronce UNS C35800 Experimento 9.

DATOS DE TEMPERATURA DEL ACERO:

Tabla 87

Temperatura-Acero Experimento 9.

P	Time	T1(°C)	T2(°C)	T3(°C)	T4(°C)	T5(°C)	T6(°C)	T7(°C)	Ta(°C)
1	10:28:57	26.5	26.7	26.0	26.2	25.6	25.5	25.3	24.0
3	10:38:57	64.1	55.1	43.0	33.0	27.2	26.8	26.5	24.5
5	10:48:57	103.7	81.4	68.8	53.3	45.5	35.8	28.8	25.7
7	10:58:57	160.6	123.1	96.8	82.7	69.5	51.3	39.0	24.2
9	11:08:57	219.5	168.3	140.0	113.1	94.4	71.6	53.9	24.5
11	11:18:57	245.1	188.0	156.6	121.5	105.3	80.5	60.7	25.1
13	11:28:57	267.7	202.7	166.5	131.8	110.4	90.0	68.4	24.4
15	11:38:57	283.0	217.0	180.1	145.8	121.3	93.5	70.6	23.2
17	11:48:57	291.8	223.8	191.5	153.4	132.1	101.0	76.0	23.9
19	11:58:57	301.8	238.9	197.8	160.9	139.1	112.6	83.7	23.4
21	12:08:57	315.6	248.8	213.7	174.6	146.8	126.6	100.8	24.4
23	12:18:57	324.9	262.2	225.4	190.3	160.1	142.3	113.7	24.7
25	12:28:57	328.3	270.3	232.9	200.6	169.8	146.3	118.5	23.5
27	12:38:57	334.1	273.2	240.6	205.6	180.4	151.8	124.3	23.8
29	12:48:57	339.1	279.7	245.4	212.1	181.9	157.0	129.2	25.3
31	12:58:57	341.9	289.1	252.4	215.4	186.3	161.2	133.3	24.1
33	13:08:57	342.4	287.5	254.0	220.9	192.3	167.6	139.8	25.2

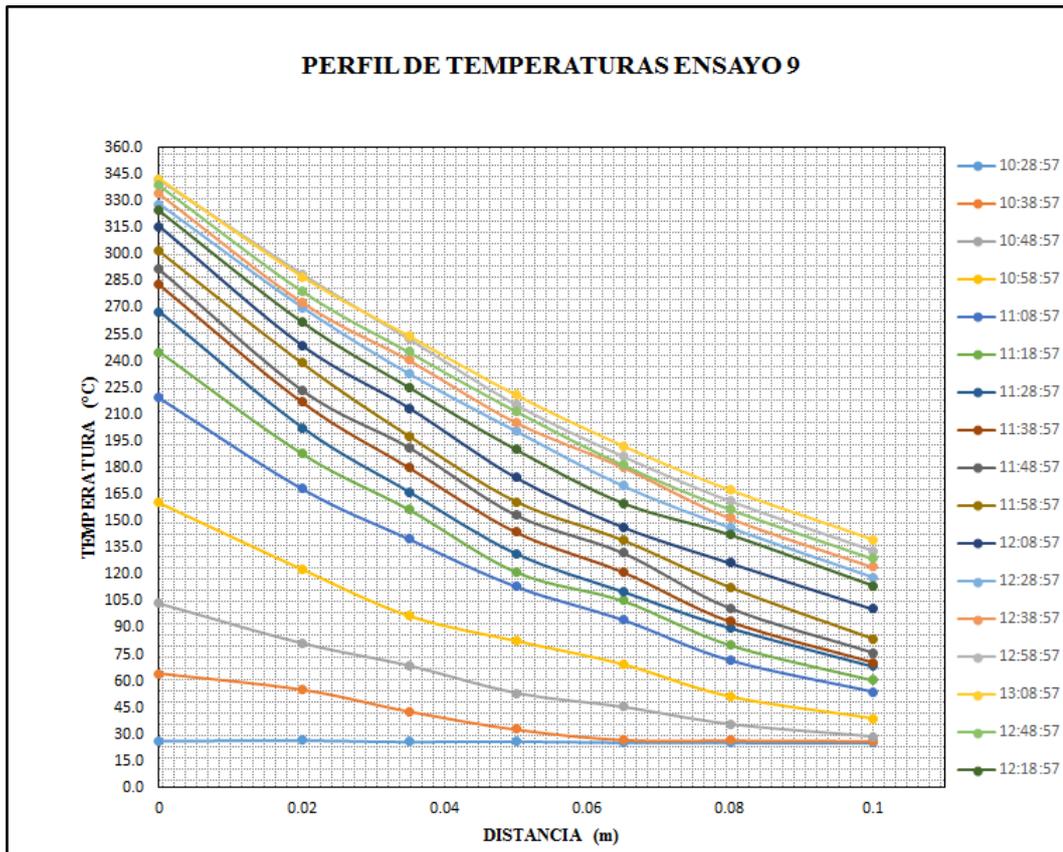


Figura 90: Perfil de Temperaturas Acero DF2 Experimento 9.

SIMULACIÓN TÉRMICA

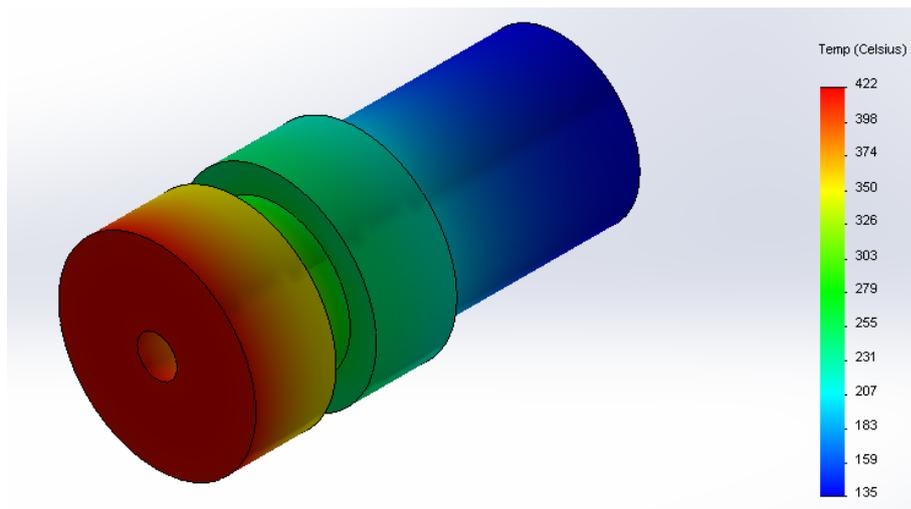


Figura 91: Simulación Térmica Acero DF2 Experimento 9.

5.2 RESULTADOS

5.2.1 CALOR PERDIDO EN LA PROBETA DE BRONCE-ANILLO

5.2.1.1 CALOR PERDIDO EN EL ANILLO SUJETADOR

$L_{anillo} = 0.050\text{m}$ es la longitud del anillo.

$k_{ac} = 51.9\text{W/mK}$ es la conductividad térmica del acero.

T_{pi} es la temperatura inicial.

T_{pf} es la temperatura final.

$r_2 = 0.055\text{m}$ el radio mayor del anillo.

$r_1 = 0.037\text{m}$ el radio menor de anillo.

$A_{s,an} = 0.028\text{m}^2$ es el área de convención.

$\epsilon_{anillo} = 0.9$.

Tabla 89

Calor Perdido en el Anillo.

Trial	T_{pf}	T_{pi}	v_{aire}	$h_{c,b-a}$	T_a	$h_{r,b-s}$	$q_{pcd,b-s}$	$q_{pc,s-a}$	$q_{pr,s-a}$	$q_{pd,b-s}$
#	[K]	[K]	[m/s ²]	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}\right]$	[K]	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}\right]$	[W]	[W]	[W]	[W]
1	400.9	402.5	0.02	2.86	294.4	8.58	65.81	8.43	25.29	99.53
2	590.6	598.4	0.54	4.42	297.3	17.90	320.82	35.82	145.01	501.65
3	391.2	396.8	0.59	4.57	302.8	8.52	230.33	11.18	20.87	262.39
4	433.1	441.6	0.57	4.51	302.0	10.135	349.61	16.37	36.78	402.76
5	522.6	535.9	1.57	7.51	295.3	13.96	547.04	47.26	87.85	682.14
6	487.6	504.0	1.6	7.6	299.9	12.46	674.54	39.49	64.75	778.79
7	673.4	684.4	1.49	7.27	302.6	23.72	452.44	74.63	243.51	770.57
8	757	768.2	1.47	7.21	298.4	29.99	460.66	91.53	380.81	933.01
9	485.2	492.1	1.61	7.63	298.3	12.27	283.8	39.48	63.5	386.78

5.2.1.2 CALOR PERDIDO EN LA PROBETA DE BRONCE

$$A_b = 4.30 \times 10^{-3} \text{m}^2$$

$$A_{ob} = 0.04 \text{m}^2$$

$$cp_b = 380 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

$$t_{calent} = 10 \text{min}$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$\epsilon_b = 0.55$$

Tabla 91

Parámetros Térmicos Resultantes para el Bronce UNS C38500.

Trial	v_{aire}	$h_{c,b-a}$	T_{s_b}	T_a	$T_{m,b-a}$	$h_{r,b-a}$	M_b	T_{b1}	T_{b2}
#	[m/s ²]	$\frac{W}{m^2K}$	[K]	[K]	[K]	$\frac{W}{m^2K}$	[g]	[K]	[K]
1	0.02	2.86	413.5	294.4	353.95	5.53	7677.9	297.2	313.8
2	0.54	4.42	626.1	297.9	462.3	12.32	7677.8	298.2	339.4
3	0.59	4.57	418.6	302.8	360.7	5.85	7677.5	305.7	323.3
4	0.57	4.51	452.0	302.0	377.0	6.68	7677.4	302.4	330.8
5	1.57	7.51	538.9	295.3	417.1	9.05	7676.1	299.2	349.9
6	1.6	7.6	524	299.9	411.94	8.72	7674.8	298.4	348.6
7	1.49	7.27	850.2	302.6	576.4	23.88	7674.2	298.5	389.3
8	1.47	7.21	704.4	298.2	501.40	15.72	7672.8	298.2	378.1
9	1.61	7.63	517.7	298.3	408.0	8.47	7672.6	298.5	344.2

Tabla 93

Calor Perdido en la Probeta de Bronce.

Trial	$q_{p_c,b-a}$	$q_{p_r,b-a}$	$q_{acc,b}$	$q_{p_d,b-s}$	q_b
#	[W]	[W]	[W]	[W]	[W]
1	13.46	26.04	80.72	99.53	219.75
2	57.33	159.86	200.34	501.65	919.18
3	20.91	26.79	85.58	262.39	395.67
4	26.74	39.62	138.09	402.76	607.2
5	72.3	87.142	246.48	682.14	1088.07
6	67.31	77.22	244.01	778.79	1167.3
7	157.34	516.97	441.32	770.57	1886.20
8	115.69	252.30	388.27	933.01	1689.27
9	66.16	73.46	222.1	386.78	748.47

5.2.2 CALOR PERDIDO EN LA PROBETA DE ACERO

$$A_{ac} = 1.886 \times 10^{-3} \text{ m}^2$$

$$A_{oac} = 0.015 \text{ m}^2$$

$$\sigma = 5.67 \times 10^{-8} \frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}}$$

$$\varepsilon_{ac} = 0.9$$

$$c p_{ac} = 460 \frac{\text{J}}{\text{kg}\cdot\text{K}}$$

$$t_{calent} = 10 \text{ min}$$

$L_{ac} = 100 \text{ mm}$ es la longitud de la probeta de acero.

$d_{ac} = 49 \text{ mm}$ es el diámetro de la probeta de acero.

Tabla 95

Propiedades del Aire para cada Experimento.

Temperatura °C	$\rho_{aire} \frac{\text{kg}}{\text{m}^3}$	$\mu_{aire} \frac{\text{kg}}{\text{m}\cdot\text{s}}$	$k_{aire} \frac{\text{W}}{\text{m}\cdot\text{K}}$	Pr
80	0.9994	2.096×10^{-5}	0.02953	0.7154
100	0.9458	2.181×10^{-5}	0.03095	0.7111
120	0.8977	2.264×10^{-5}	0.03235	0.7073
130	0.8764	2.305×10^{-5}	0.03305	0.7057
140	0.8542	2.345×10^{-5}	0.03374	0.7041
180	0.7788	2.504×10^{-5}	0.03646	0.6992
230	0.7016	2.688×10^{-5}	0.03975	0.6955
290	0.6269	2.9×10^{-5}	0.04356	0.6936
300	0.6158	2.934×10^{-5}	0.04418	0.6935

Fuente: [Cengel and Hernán Pérez, 2004]Tabla A-15

Tabla 97

Parámetros Térmicos Resultantes para el Acero DF2.

Trial	T_a	T_{sac}	T_f	ω	β	Re_ω	Gr_D	$h_{c,ac-a}$	$h_{r,ac-a}$
#	[K]	[K]	[K]	rad/s				$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$	$\left[\frac{\text{W}}{\text{m}^2\text{K}} \right]$
1	294.4	416.9	355.65	14.55	0.0028	5235.20	903788	21.2	9.18
2	297.9	609.5	453.7	24.69	0.0022	5793.03	766777.13	27.96	19.06
3	302.8	409.8	356.3	26	0.0028	9349.92	787991.14	31.45	9.23
4	302.0	450.7	376.35	24.19	0.0027	7912.73	857558.16	29.39	10.88
5	295.3	538.5	416.9	106.98	0.0024	29394.65	893351.48	79.8	14.79
6	299.9	511.9	405.88	106.97	0.0025	30678.95	871287.02	80.54	13.65
7	302.6	837.7	570.15	53.51	0.0018	8471.71	477158.01	43.86	37.83
8	298.4	700.6	499.5	53.77	0.002	8768.22	434274.54	44.27	25.44
9	298.5	503.0	400.65	107.74	0.0025	30898.19	852457.67	80.93	13.13

Tabla 99

Calor Perdido en la Probeta del Acero.

Trial	m_{ac}	T_{ac1}	T_{ac2}	$q_{pc,ac-a}$	$q_{pr,ac-a}$	$q_{acc,ac}$	q_{ac}
#	[g]	[K]	[K]	[W]	[W]	[W]	[W]
1	2927.3	313.8	296.2	39.59	17.15	39.50	96.24
2	2927.2	339.4	297.2	141.71	96.64	94.70	333.05
3	2927.2	323.3	304.7	56.06	16.46	41.74	114.26
4	2927.1	330.8	301.4	67.87	25.12	65.98	158.98
5	2927.0	349.9	298.2	298.26	55.28	116.02	469.56
6	2927.0	348.6	297.4	277.81	47.07	114.90	439.79
7	2926.9	389.3	297.5	369.70	318.91	206.00	894.62
8	2926.8	378.1	297.2	387.46	222.63	181.55	791.64
9	2926.8	344.2	297.5	270.50	43.87	104.80	419.2

5.2.3 CALOR GENERADO POR FRICCIÓN

$$A_c = 0.0017\text{m}^2$$

$$R_o = 0.0245\text{m}$$

$$R_i = 0.0075\text{m}$$

Tabla 101

Calor Generado por Fricción.

Trial	$F_a(\text{N})$	$\rho^o(\text{MPa})$	$\omega(\text{rpm})$	$\omega(\text{rad/s})$	$q_{Gf}(\text{W})$
1	1338	0.78	139	14.56	340.80
2	3024	1.77	235.8	24.69	1307.27
3	1168.6	0.68	248.25	25.997	531.80
4	1966	1.15	231	24.19	833.59
5	2315.8	1.36	1021.6	106.98	4336.85
6	2699.8	1.58	1021.5	106.97	5055.59
7	3249	1.90	511	53.51	3043.17
8	2920	1.71	513	53.77	2749.03
9	1368	0.8	10288.8	107.74	2579.96

5.2.4 RESULTADOS POR EXPERIMENTO

En todos los experimentos el calor útil que se podría usar en investigaciones y aplicaciones futuras es el Calor Perdido en el Bronce ya que de este elemento se puede aprovechar esa energía.

5.2.4.1 EXPERIMENTO 1

Tabla 103

Resultados Experimento 1.

TABLA DE RESULTADOS	
Calor Generado por Fricción	340.80W
Calor Perdido en el Bronce	219.75W
Calor Perdido en el Acero	96.23W
Calor Total Perdido	315.98W
Error	7.3 %
Masa de Bronce Inicial	7677.9 g
Masa de Bronce Final	7677.8 g
Pérdida de Masa	0.1 g
Temperatura de Contacto	157.68°C

5.2.4.2 EXPERIMENTO 2

Tabla 104

Resultados Experimento 2.

TABLA DE RESULTADOS	
Calor Generado por Fricción	1307.27W
Calor Perdido en el Bronce	919.18W
Calor Perdido en el Acero	333.05W
Calor Total Perdido	1184.20W
Error	4.2 %
Masa de Bronce Inicial	7677.8 g
Masa de Bronce Final	7677.5 g
Pérdida de Masa	0.3 g
Temperatura de Contacto	426.44°C

5.2.4.3 EXPERIMENTO 3

Tabla 105

Resultados Experimento 3.

TABLA DE RESULTADOS	
Calor Generado por Fricción	531.80W
Calor Perdido en el Bronce	395.67W
Calor Perdido en el Acero	114.26W
Calor Total Perdido	509.93W
Error	4.11 %
Masa de Bronce Inicial	7677.5 g
Masa de Bronce Final	7677.4 g
Pérdida de Masa	0.1 g
Temperatura de Contacto	175.10°C

5.2.4.4 EXPERIMENTO 4

Tabla 106

Resultados Experimento 4.

TABLA DE RESULTADOS	
Calor Generado por Fricción	832.59W
Calor Perdido en el Bronce	607.21W
Calor Perdido en el Acero	158.98W
Calor Total Perdido	766.19W
Error	7.97 %
Masa de Bronce Inicial	7677.4 g
Masa de Bronce Final	7676.1 g
Pérdida de Masa	1.3 g
Temperatura de Contacto	228.96°C

5.2.4.5 EXPERIMENTO 5

Tabla 107

Resultados Experimento 5.

TABLA DE RESULTADOS	
Calor Generado por Fricción	4336.85W
Calor Perdido en el Bronce	1088.07W
Calor Perdido en el Acero	469.56W
Calor Total Perdido	1557.63W
Error	64 %
Masa de Bronce Inicial	7676.1 g
Masa de Bronce Final	7674.8 g
Pérdida de Masa	1.3 g
Temperatura de Contacto	356.66°C

5.2.4.6 EXPERIMENTO 6

Tabla 108

Resultados Experimento 6.

TABLA DE RESULTADOS	
Calor Generado por Fricción	5055.6W
Calor Perdido en el Bronce	1167.3W
Calor Perdido en el Acero	439.79W
Calor Total Perdido	1607.12W
Error	77 %
Masa de Bronce Inicial	7674.8 g
Masa de Bronce Final	7674.2 g
Pérdida de Masa	0.6 g
Temperatura de Contacto	324.13°C

5.2.4.7 EXPERIMENTO 7

Tabla 109

Resultados Experimento 7.

TABLA DE RESULTADOS	
Calor Generado por Fricción	3043.17W
Calor Perdido en el Bronce	1886.20W
Calor Perdido en el Acero	894.62W
Calor Total Perdido	2780.8W
Error	8.6%
Masa de Bronce Inicial	7674.2 g
Masa de Bronce Final	7673.9 g
Pérdida de Masa	0.3 g
Temperatura de Contacto	752.20°C

5.2.4.8 EXPERIMENTO 8

Tabla 110

Resultados Experimento 8.

TABLA DE RESULTADOS	
Calor Generado por Fricción	2749.03W
Calor Perdido en el Bronce	1689.27W
Calor Perdido en el Acero	791.64W
Calor Total Perdido	2480.9W
Error	9.8%
Masa de Bronce Inicial	7672.8 g
Masa de Bronce Final	7672.6 g
Pérdida de Masa	0.2 g
Temperatura de Contacto	747.17

5.2.4.9 EXPERIMENTO 9

Tabla 111

Resultados Experimento 9.

TABLA DE RESULTADOS	
Calor Generado por Fricción	2579.69W
Calor Perdido en el Bronce	748.47W
Calor Perdido en el Acero	419.17W
Calor Total Perdido	1167.6W
Error	54.8 %
Masa de Bronce Inicial	7672.6 g
Masa de Bronce Final	7672.2 g
Pérdida de Masa	0.4 g
Temperatura de Contacto	387°C

5.3 ANÁLISIS DE RESULTADOS

Se toma el arreglo ortogonal L9 de Taguchi y se combinó las variables utilizadas en 9 experimentos y cada experimento generó un valor de calor a coste de una cantidad de masa desgastada. A continuación se detalla la tabla con estos valores mencionados y de igual manera se realiza un cálculo para determinar la tasa de calor generado por unidad de masa perdida (W/g).

Tabla 112

Parámetros y Resultados de cada Experimento.

VARIABLES Y RESULTADOS DE LOS EXPERIMENTOS					
N°	PARÁMETROS DEL EXPERIMENTO		MASA PERDIDA	CALOR GENERADO	RESULTADO
	Fuerza de aplastamiento (kg)	Velocidad de rotación (rpm)	(g)	(W)	Tasa de masa perdida por unidad de calor generado (W/g)
1	150	100	0,1	219.8	2198
2	350	250	0,3	919.2	3064
3	150	250	0,1	395.7	3957
4	250	250	1,3	607.2	467
5	250	1000	1,3	1088.1	837
6	350	1000	0,6	1167.3	1946
7	350	500	0,3	1886.2	6287
8	250	500	0,2	1689.3	8446
9	150	1000	0,4	748.5	1871

5.3.1 ANÁLISIS DE RESULTADOS DEL CALOR GENERADO POR FRICCIÓN.

Los datos descritos en la Tabla 4.71 se ingresaron en un programa estadístico para determinar el cumplimiento de las siguientes hipótesis:

- Para la velocidad de rotación:
 - H0: La velocidad de rotación no afecta a la generación de calor.
- Para la fuerza de aplastamiento:
 - H1: La fuerza si afecta a la generación de calor.

En la Tabla 4.72 se visualiza la tabla ANOVA con los resultados del experimento para el análisis de generación de calor.

Tabla 113

Análisis de Resultados para el Calor Generado.

ANOVA					
FUENTES DE VARIACIÓN	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRADOS	CUADRADO MEDIO	F EXP	F TAB
	gl	SC	CM		
v. factores				3,85	0,117
F2: fuerza de aplast.	2	1248222	624111		
F1: v de rotación.	2	589498	294749		
V.error	4	647848	161962	1,82	0,274
V.total	8	2485569			

Se concluye que como la F exp es mayor que la F tab en el factor de velocidad de rotación se acepta H0, lo cual quiere decir que la velocidad de rotación si afecta a la generación de calor. Del mismo modo, en el factor de fuerza de aplastamiento la F exp es mayor que la F tab se acepta H1, lo cual quiere decir que la fuerza de aplastamiento si afecta a la generación de calor. En la Figura 92 se puede comprobar estas afirmaciones de hipótesis ya que si, por ejemplo, se visualiza el experimento número 7, este produce más calor, pero este experimento no tiene el valor máximo de velocidad pero si tiene el valor máximo de fuerza, es decir generó más calor por la influencia de la fuerza y del valor de la velocidad media.

Los calores con mayores valores se producen a 500 rpm y a 350 kg de fuerza. Sin embargo, en posteriores conclusiones se determina valores óptimos en base a la resistencia mecánica que ofrecen los componentes a elevadas temperaturas.

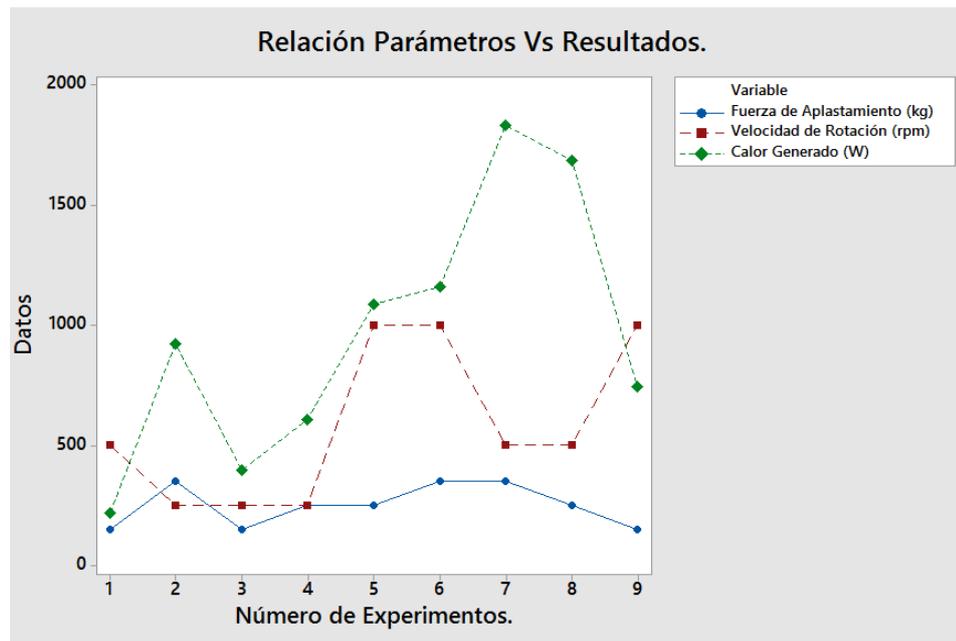


Figura 92: Resultados y Variables Involucradas.

En la Figura 93 se puede visualizar que los experimentos con más generación de calor son los que tienen la mayor fuerza de aplastamiento.

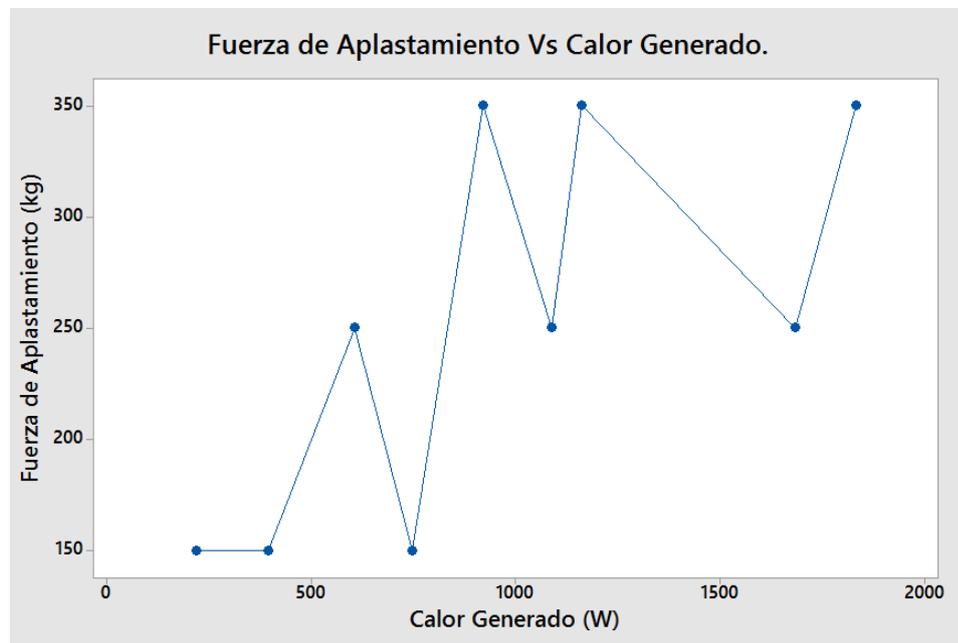


Figura 93: Fuerza de Aplastamiento Vs Calor Generado.

En la Figura 94 se puede visualizar que los experimentos con más generación de calor son los que tienen una velocidad de rotación de 500 rpm. Este es el valor intermedio de las tres velocidades utilizadas en los experimentos de fricción.

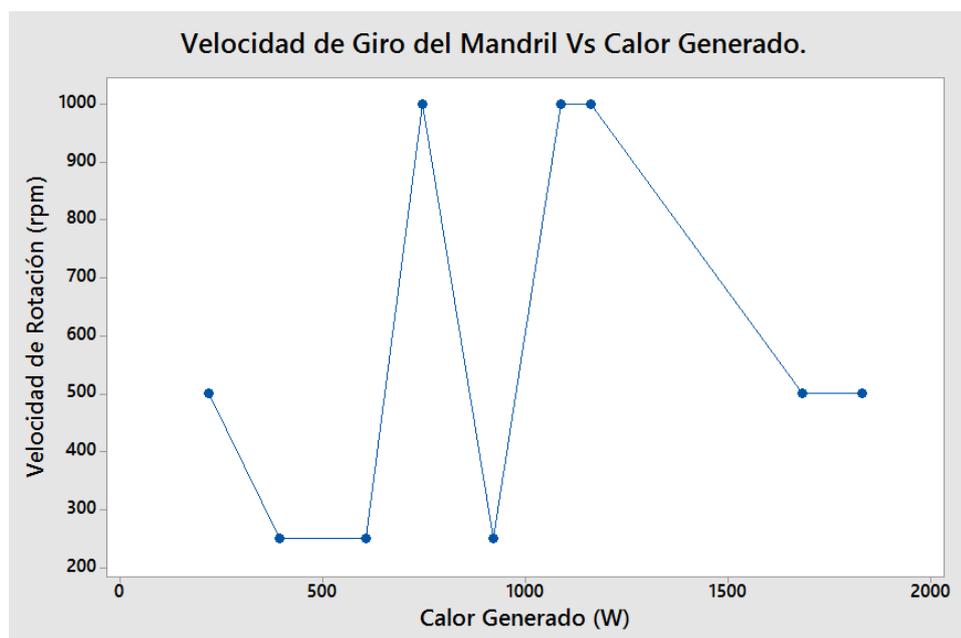


Figura 94: Velocidad de Rotación Vs Calor Generado.

En la Figura 95 se puede observar cómo se genera calor a través de las variables utilizadas. Del mismo modo, los experimentos con mayor fuerza de aplastamiento generan más calor.

El mejor experimento es el 7 es decir al utilizar 350 kg de fuerza de aplastamiento inicial con 500 rpm de velocidad de rotación el cual produce más calor. Esta afirmación es susceptible de análisis ya que el calor generado sobrepasa las temperaturas a las cuales las probetas se modifican en cuanto a sus propiedades mecánicas. Primero se analizará la masa perdida por cada experimento y luego se concluirá el mejor experimento y de este modo los mejores parámetros para someter a fricción los materiales descritos anteriormente.

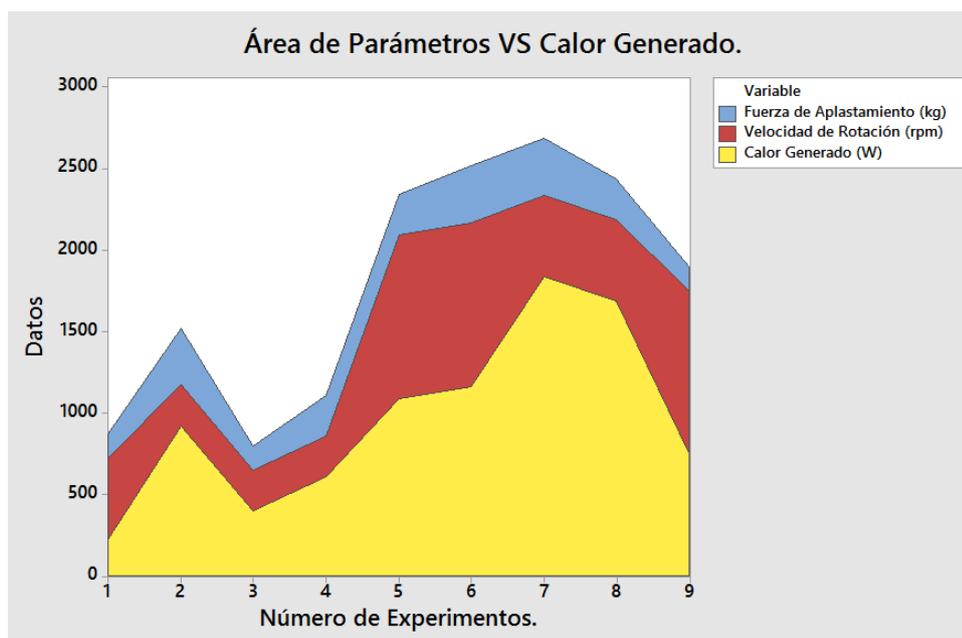


Figura 95: Áreas de las Variables y Resultado Obtenido.

Experimento 1, a 140 rpm y 136 kg de fuerza de aplastamiento presenta una diferencia del calor generado con el calor perdido del 7.3 % esto se debe a variaciones de la temperatura ambiente, variaciones en las propiedades del material, alcanzando una temperatura de estabilización de 142 °C, este experimento generó 220W de calor útil con una pérdida de masa de 0.1g. El Experimento 2, a 250 rpm y 356.78 kg de fuerza de aplastamiento se obtuvo una temperatura de 355 °C con una variación de calor generado y calor perdido de 4.2 % esto representa una buena aproximación del sistema de generación de calor perdiendo 0.3 g en 4 horas de experimento generó 919.18W de calor útil.

En el Experimento 3 el valor del calor generado resultante presenta un error del 4.11 % con respecto al valor perdido a una temperatura máxima de 146 °C a 250 rpm y 133.82 kg de fuerza de aplastamiento generando 395.97W de calor útil con una pérdida de masa de 0.1g. Para el Experimento 4 el calor útil fue de 607.21W a 250 rpm y 235.47 kg de fuerza de aplastamiento con una masa perdida por desgaste de 1.3g y un error entre el calor generado y el calor perdido de 8 %.

En el Experimento 5 se obtuvo una pérdida de masa de 1.3g generando 1088.07W de calor útil a 1030 rpm y 235.73 kg de fuerza de aplastamiento produciendo una temperatura máxima de 266°C, el error entre el calor generado y el calor producido es de 64 % esto nos indica que solo se pudo aprovechar un 36 % del calor generado a esa velocidad de rotación ya que el torque que se utilizó disminuye de 540Nm a 70Nm reduciendo así la fuerza de fricción al igual que en el Experimento 6 el error es de 7 % produciendo un calor útil de 1167.3W de calor a 1030 rpm y 333.74 kg de fuerza de

aplastamiento, perdiendo una masa de 0.6g a una temperatura de 251°C.

El Experimento 7 a 516 rpm y 331.5 kg de fuerza de aplastamiento se obtuvo una pérdida de masa de 0.3g generado un calor útil de 1886.20W a una temperatura de 577°C con un error de 8.6 % entre el calor generado y el calor perdido en las probetas. Para el Experimento 8 el calor generado por fricción es de 2749.03W con un error del 9.8 % con respecto al calor perdido igual a 1689.27W con unas condiciones experimentales de 298kg a 516rpm perdiendo una masa de 0.2g con una temperatura máxima de 593.9 °C.

En el Experimento 9 se obtuvo un error del 54.8 % entre el calor generado y el calor perdido, con 2579.69W de calor generado por fricción con un calor útil de 748.47 y una masa perdida de 0.4g a 140kg y 1030rpm con una temperatura máxima en la superficie fue de 244°C.

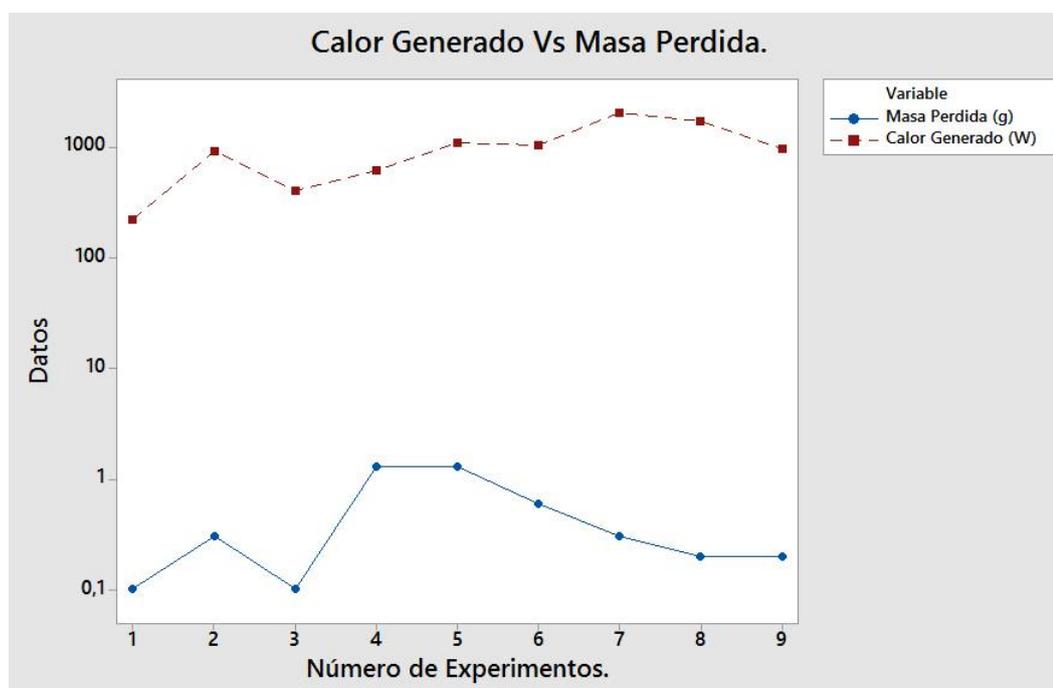


Figura 96: Calor Generado y Masa Perdida.

De manera general en la Figura 96 se puede observar que los menores valores de masa perdida con mayores valores de calor generado son los experimentos 2,7,8.

5.3.2 ANÁLISIS DE RESULTADOS DE LA MASA PERDIDA EN CADA EXPERIMENTO.

Los datos descritos en la Tabla 112 se ingresaron en un programa estadístico para determinar el cumplimiento de las siguientes hipótesis:

- Para la velocidad de rotación:
 - H0: La velocidad de rotación no afecta a la pérdida de masa.
- Para la fuerza de aplastamiento:
 - H1: La fuerza si afecta a la pérdida de masa.

En la Tabla 114 se visualiza la tabla ANOVA con los resultados del experimento. A continuación se detalla la tabla ANOVA para análisis de masa perdida en cada experimento.

Tabla 114

Análisis de Resultados para Pérdida de Masa.

ANOVA					
FUENTES DE VARIACIÓN	GRADOS DE LIBERTAD	SUMA DE CUADRAD	CUADRADO MEDIO	F EXP	F TAB
	gl	SC	CM		
v. factores				4,00	0,111
F2: fuerza de aplast.	2	0,8622	0,4311		
F1: v de rotación.	2	0,4956	0,2478		
V.error	4	0,4311	0,1078	2,30	0,216
V.total	8	1,7889			

De este modo, como se realizó el análisis con el calor generado, el resultado es el mismo: se aceptan ambas hipótesis, es decir tanto la fuerza de aplastamiento como las revoluciones del mandril afectan a la pérdida de masa. En la gráfica siguiente se muestra la influencia de los parámetros conjuntamente con la cantidad de masa perdida en cada experimento. Se ajustó la gráfica a escala logarítmica para poder visualizar la masa perdida ya que los valores son muy pequeños en comparación con los valores que proporcionan los otros parámetros. Se visualiza que la menor masa perdida se da a 500 rpm.

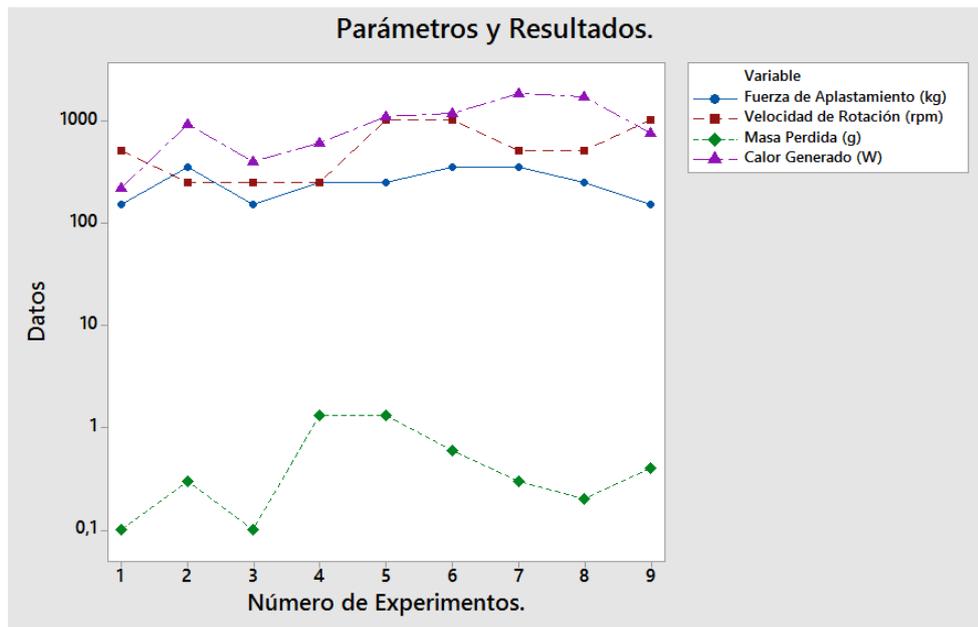


Figura 97: Pérdida de Masa y Variables Involucradas.

El mejor experimento es el número 7, seguido de los experimentos 8 y 2 ya que producen mayor calor con la menor cantidad de masa perdida. Sin embargo, la temperatura alcanzada del experimento 7 y 8 pasan los 600°C en la superficie y los 750 °C en el núcleo de fricción. Estas temperaturas hacen que se modifiquen las propiedades mecánicas de las probetas mismas que decrecen en cuanto a dureza y con estos las propiedades de resistencia a la tracción y rotura. Por tanto el experimento N° 2 es el indicado para usarlo en aplicaciones varias posteriores ya que la temperatura máxima alcanzada en este experimento es de 360°C.

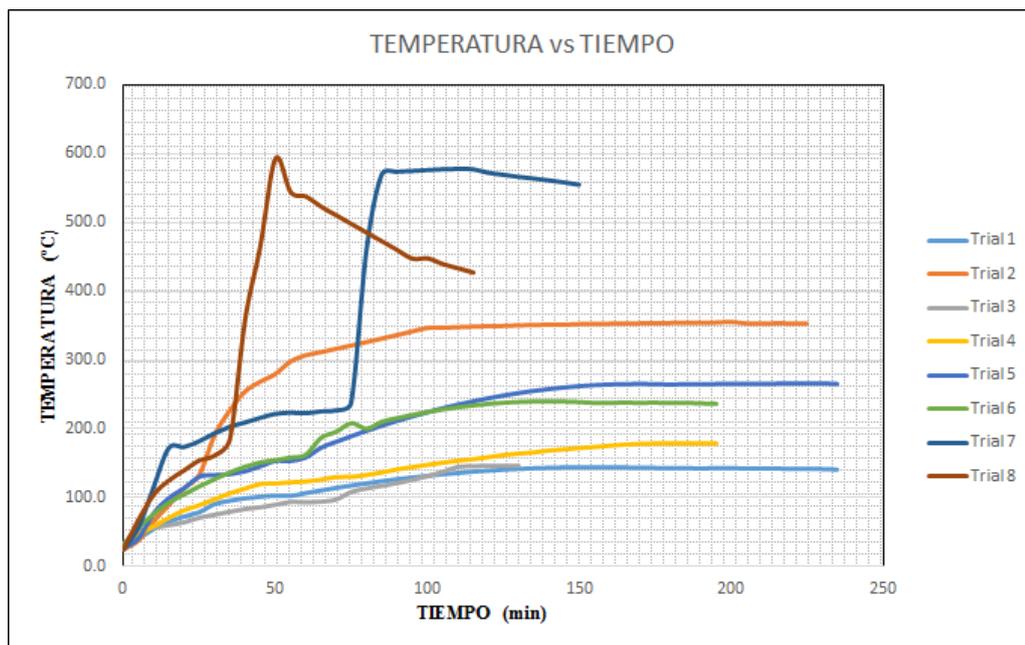


Figura 98: Gráfica de Temperatura vs Tiempo.

Analizando la Figura 98 los experimentos 7 y 8 tienen incrementos heterogéneos de temperatura sin estabilización a la temperatura máxima, del mismo modo, los valores máximos se puede observar en el eje y que aproximadamente a 600°C con lo cual se modifican las propiedades mecánicas de las probetas. En cambio, si se observa el experimento 2 este tiene un incremento homogéneo de temperatura y una estabilización adecuada para el uso en cualquier aplicación, por tanto se toma este experimento como el más óptimo cuyos parámetros iniciales son 350 kg y 250 rpm.

5.4 RESULTADOS METALOGRAFICOS

Después de haber concluido los experimentos, se realizó un ensayo de dureza para el acero y metalográfico tanto para el acero como para el bronce, para analizar cambios en la microestructura de los materiales debido a los esfuerzos térmicos y mecánicos involucrados en los experimentos.

5.4.1 PROBETA DE ACERO DF2

Se observa en las siguientes imágenes la microestructura del Acero DF2 para comparar si existió una alteración en la misma debido a las elevadas temperaturas que soportó la probeta de acero, en especial la cara que fue sometida a la fricción.

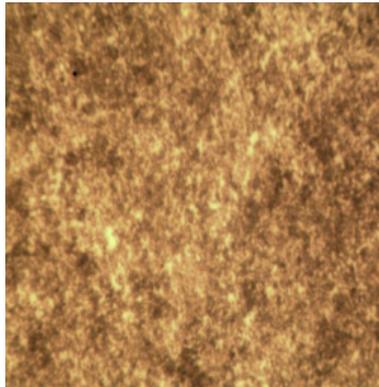


Figura 99: Micrografía Inicial Acero DF2 Iván Bohman.
Nital 4 %, 14s amplificación 400X.
Fuente: [Lidia Cepeda, 2013].

Se puede observar en la Figura 100 que el acero presenta una distribución homogénea tanto de perlita y ferrita con una micro-estructura de grano fino.



Figura 100: Micrografía Acero AISI 01.
Nital 3 %, 15s amplificación 100X.
Fuente: [Luis Soriano, 2012].

En la Figura 101 observamos que la distribución de la micro estructura cambió, ya no presenta una distribución homogénea de ferrita-perlita y el tamaño de grano es alargado, comparando de esta forma la probeta de acero sufrió una transformación en su microestructura debido a las altas temperaturas de fricción a las cual fue sometida.

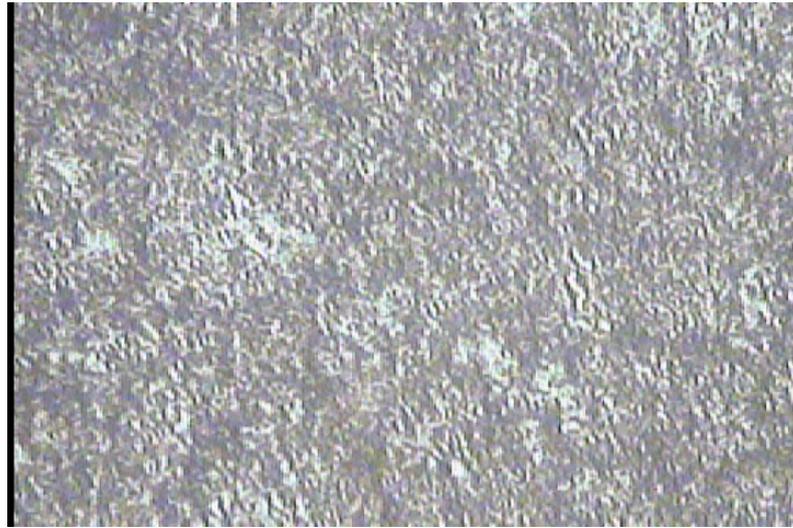


Figura 101: Micrografía Acero DF2 después de los Experimentos.
Nital 3%, amplificación 400X.

5.4.1.1 MEDICIÓN DE DUREZA

Se procede a medir la dureza en diferentes posiciones siendo la más crítica la cara en contacto con la probeta de bronce que es el área que más temperatura soportó, se obtiene los siguientes resultados:

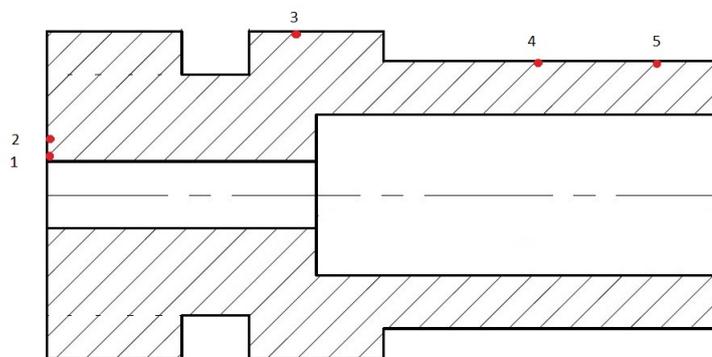


Figura 102: Posiciones de las Mediciones.

Tabla 115: Datos Promedios de la Dureza Medida para el Acero DF2.

Datos Dureza Acero DF2

Dureza (HRC)	Posición
31.9	1
34.5	2
48.4	3
55.9	4
57.3	5

En la Figura 103 observamos como disminuye la dureza a medida que se acerca a las zonas donde se produjo la mayor concentración de calor donde se alcanzó aproximadamente 750°C con lo cual las propiedades como la dureza se ven afectadas de manera permanente, la dureza disminuyó de 63HRC a 31.9HRC.

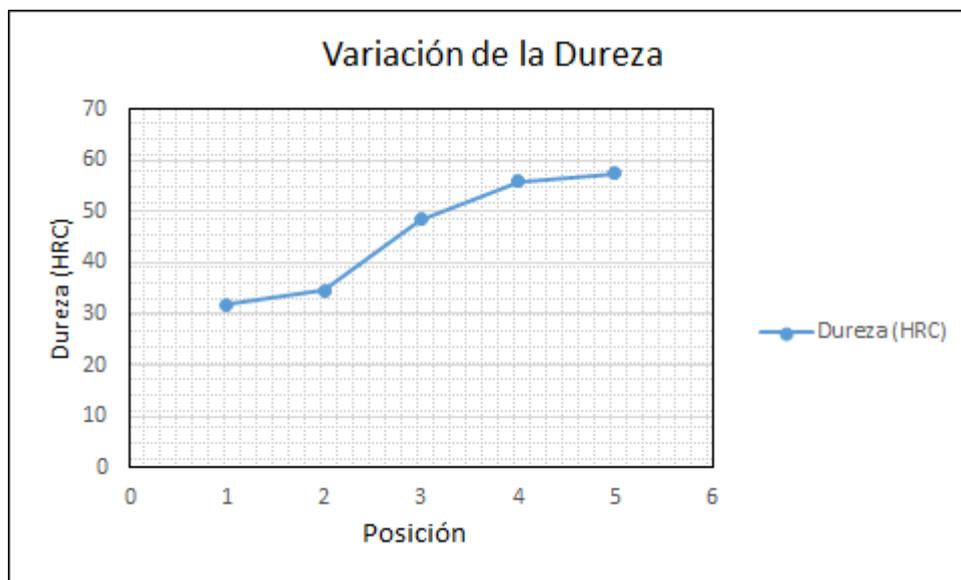


Figura 103: Variación de la Dureza.

5.4.2 PROBETA DE BRONCE DULCE UNS C38500

En la siguiente figura se observa la microestructura de una lámina de Bronce (60% Cu- 40% Zn).

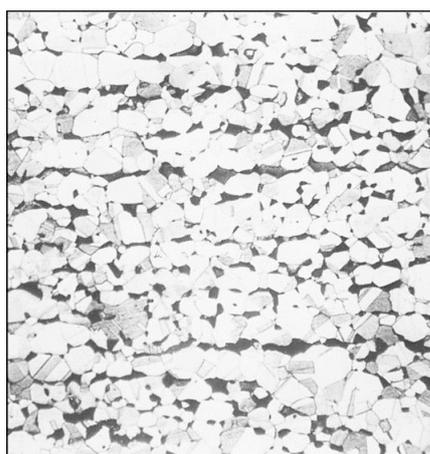


Figura 104: Lámina de Metal de Muntz Laminada en Caliente (60% Cu- 40% Zn).

La estructura consiste en una fase beta (oscura) y una fase alfa (clara).

(Decapante: NH₄OH + H₂O₂; amplificación 75x.)

Fuente: [Aguilar, 2013].

En la Figura 105 se observa la micro-estructura de la probeta de bronce luego de

los experimento 1, 2 y 3 en donde se observa que los granos no se encuentran alineados es decir existió un cambio en su tamaño de grano a causa de una temperatura elevada en este caso de 350°C.

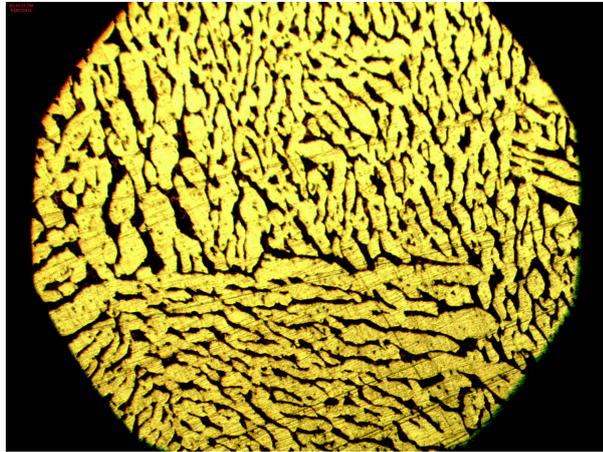


Figura 105: Probeta de Bronce Inicial UNS C38500 (Experimentos 1-2-3).
Decapante: $K_2Cr_2O_7+H_2SO_4+H_2O$; amplificación 400×.

En la siguiente Figura se observa dos metalografías las cuales presentan tamaños de granos alargados y no uniformes debido a un enfriamiento rápido desde una temperatura muy elevada aproximadamente de 750°C en la cara de contacto proveniente de los experimentos 7-8.

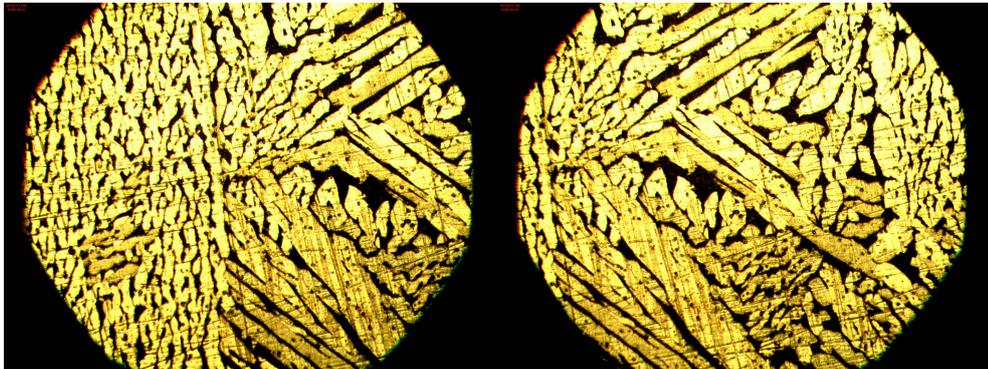


Figura 106: Probeta de Bronce UNS C38500 (Experimentos 7-8).
Decapante: $K_2Cr_2O_7+H_2SO_4+H_2O$; amplificación 400×.

CAPÍTULO 6

CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

6.1 CONCLUSIONES

- Se determinó que la geometría es óptima ya que permitió la transferencia de calor máxima hacia la probeta de bronce la cual alcanzó 593.9°C en la superficie y en el extremo más alejado del contacto alcanzó 506°C y se aprovechó la generación de calor en un 85%. La transferencia de calor hacia la probeta de acero fue mínima ya que la temperatura en el extremo más alejado del contacto fue de 170°C reduciendo la temperatura un 70%. De esta forma, los componentes del torno se mantuvieron a 90°C, mismos que no fueron modificados ni alterados en cuanto a su resistencia mecánica.
- La geometría determinada provee áreas mínimas necesarias que resistieron a esfuerzos de aplastamiento y torsión máximos dando un factor mínimo de seguridad de 1.9 en la zona más crítica en la probeta de acero.
- La geometría determinada posee las tolerancias óptimas, 0.1 de cilindridad. Así, la fricción se dio en toda la superficie de contacto entre las dos probetas.
- La geometría determinada se ajustó a las dimensiones del torno. Así, las probetas se friccionaron de manera adecuada sin ningún tipo de descentramiento, cabeceo o desalineamiento.
- Se estableció la seguridad de los elementos: La probeta de acero tiene un factor de seguridad de 1.93, la probeta de bronce tiene 1.86, el anillo 1.83, la chaveta 2.2 y los pines de la luneta es el lugar donde se sujeta el anillo en la luneta tienen 6.6. Estos valores se calcularon en las condiciones más críticas, es decir se diseñaron para el caso de que el sistema se pare y toda la torsión actúe sobre el mismo, el experimento no funcionaría en este caso y los valores de seguridad serían mucho mayores.

- El acero DF2 cumplió con las condiciones iniciales de diseño ya que este presentó un desgaste mínimo de 0,5 g valor acumulado en todos los experimentos, no existió arranque de material del acero ya que este se desgastó de manera homogénea. De la misma manera, no se presentó fisuras, agrietamientos o ralladuras en la cara frontal de contacto ya que este material fue seleccionado por su alta dureza (debido al tratamiento térmico), su alta resistencia a la fluencia y rotura.
- El bronce dulce a temperaturas menores a 400°C se comportó de manera adecuada, es decir no se presentaron deformaciones plásticas permanentes debido a los esfuerzos termo-mecánicos. Sin embargo, en el experimento 7 y 8 la temperatura alcanzó valores superiores a 700°C con lo cual se modificó la estructura interna y con esto sus propiedades mecánicas.
- El anillo de sujeción fabricado cumplió el objetivo para el cual fue diseñado y se obtuvo el bloqueo de la rotación del bronce mediante un sistema chaveta y chavetero. Este se sujetó de manera estática a la luneta del torno.
- El chavetero y el tamaño de la chaveta fueron diseñados y construidos como parte del mecanismo de sujeción, así se obtuvo bloquear la rotación de la probeta de bronce y permitió el deslizamiento axial con lo que se logró ajustar la fuerza de aplastamiento.
- La mayor temperatura alcanzada fue de 594°C en la superficie de la probeta de bronce y de 747°C en el interior del agujero de fricción. Estas temperaturas se alcanzaron en el experimento número 8. La relación calor generado y masa perdida es de 8475 W/g es decir este experimento generó más calor por menos masa perdida, de igual manera el análisis realizado con la tabla ANOVA nos dice que en este experimento las variables que más influyen en los resultados son la fuerza de aplastamiento y la velocidad de rotación del mandril. Los datos del experimento 8 son: 500 rpm lo cual produce un torque en el mandril de 140Nm y 250 kg de fuerza de aplastamiento. Sin embargo, por problemas mecánicos como deformación plástica por esfuerzo térmico, se vence el límite elástico del material y de igual manera las propiedades como dureza y resistencia se alteran de forma permanente, se descarta este experimento como el más óptimo.
- Si se visualiza la Figura 98 donde está el incremento de temperatura contra el tiempo. En el experimento 2 se incrementa la temperatura de manera uniforme y homogénea y se estabiliza en 353 °C. La pérdida de masa es de 0.3 g, la relación de calor generado 2836 W/g, el torque fue de 281 Nm a 250 rpm y la fuerza de 350 kg lo cual concuerda con los resultados de la tabla ANOVA. Se toma

este experimento como el más óptimo ya que el incremento de temperatura es homogéneo, la estabilización de la temperatura se produce a un valor menor de 400°C y así las propiedades de los materiales se modifican en la zona elástica lo cual se puede incluir en los cálculos de diseño de los elementos.

- La conclusión general es que la tasa de pérdida de masa es mínima cuando se usa una velocidad de rotación de 250 rpm y una fuerza de aplastamiento inicial de 250 kg a 350 kg con torques adecuados de 140 Nm a 250 Nm implementados en un sistema que evite el descentramiento y que regule las fuerzas que se producen por dilatación en la dirección axial.

6.2 RECOMENDACIONES

- La temperatura máxima alcanzada al friccionar los dos materiales fue de 594 °C en la superficie. La temperatura máxima alcanzada en el interior del agujero del bronce fue estimada en 747.17°C mediante una fórmula de temperatura de contacto. Posteriormente estos se enfriaron al ambiente produciéndose un revenido de los materiales. Entonces, al medir las propiedades de dureza tanto el bronce como el acero disminuyeron sus valores y con esto todas sus propiedades. Por tanto es recomendable realizar un sistema que controle la fuerza de aplastamiento y de esta manera el incremento de temperatura. La temperatura máxima recomendada que debe alcanzar las aplicaciones posteriores deberá ser de 400°C.
- Si bien la fuerza de aplastamiento inicial medida en la celda de carga fueron valores pequeños, la dilatación axial que experimenta el bronce hace que estas fuerzas se incrementen hasta valores demasiado altos. De esta forma la fuerza de aplastamiento se tornaría en un valor incontrolable y no se podría tener aplicaciones reales. Por esta razón si se llegase a fabricar un par de bronce-acero para alguna aplicación externa como un caldero se recomienda implementar un sistema de control de la dilatación que experimenta la probeta de bronce. Por lo visualizado en los experimentos se puede ubicar un sistema en el cual un extremo esté libre y controlado por un sistema de medición de fuerza. Este sistema puede incorporar una celda de carga de mayor capacidad ya que las fuerzas de dilatación son mayores y aislar térmicamente la celda para que esta no sufra daños. El aislante puede ser un material cerámico de baja conductividad térmica instalado entre la celda y la probeta de bronce.
- El descentramiento es un factor que se puede controlar en el ambiente del torno. Sin embargo, el desgaste no homogéneo de la superficie puede ocasionar descentramiento y por tanto la probeta de acero empezaría a desgarrar la probeta de bronce. La temperatura se eleva de manera no controlada y se generan fuerzas radiales lo cual ocasionaría otros esfuerzos y por tanto problemas mecánicos de estabilidad y fractura. Se recomienda fijar un rodamiento con un sistema de aislamiento de calor a este y así evitar dicho descentramiento. Así, el contacto sería sólo en la cara de fricción, el desgaste sería homogéneo y la temperatura crecería uniformemente hasta tal punto de estabilizarse logrando una tasa de pérdida de masa mínima.

REFERENCIAS

- [Aguilar, 2013] Aguilar, J. A. (2013). Cobre y sus aleaciones. <http://docplayer.es/332645-Cobre-y-sus-aleaciones-julio-alberto-aguilar-schafer.html>[Citado el 18/02/2016].
- [Antonio-García et al., 2013] Antonio-García, A., Linares-Flores, J., and Arias-Montiel, M. (2013). Investigación numérica de las condiciones de lubricación en chumaceras hidrodinámicas con el efecto del desalineamiento del eje. *Ingeniería, investigación y tecnología*, 14(1):89–98.
- [Barragán, 2009] Barragán, D. (2009). Producción de entropía y ley de enfriamiento de newton. *Ingeniería e Investigación*, 29(2):88–93.
- [Bhushan, 2013] Bhushan, B. (2013). *Introduction to tribology*. John Wiley & Sons.
- [Bohman, 2016] Bohman, I. (2016). *Catálogo General*. Ivan Bohman.
- [Bowden and Tabor, 1950] Bowden, F. P. and Tabor, D. (1950). The friction and lubrication of solids-{Part I}.
- [Budynas et al., 2008] Budynas, R. G., Nisbett, J. K., Murrieta, J. E. M., and Miguel, E. A. (2008). *Diseño en ingeniería mecánica de Shigley*. McGraw-Gill Interamericana.
- [Cengel and Hernán Pérez, 2004] Cengel, Y. A. and Hernán Pérez, J. (2004). Heat transfer: a practical approach. transferencia de calor/.
- [Cozza, 2014] Cozza, R. C. (2014). Influence of the normal force, abrasive slurry concentration and abrasive wear modes on the coefficient of friction in ball-cratering wear tests. *Tribology International*, 70:52–62.
- [Davis et al., 2001] Davis, J. R. et al. (2001). *Copper and copper alloys*. ASM international.
- [Eisen-Kohlenstoff, 2005] Eisen-Kohlenstoff (2005). Diagramm stabil und metastabil mit phasenbeschriftung.

- [Fung and Kang, 2005] Fung, C.-P. and Kang, P.-C. (2005). Multi-response optimization in friction properties of pbt composites using taguchi method and principle component analysis. *Journal of materials processing technology*, 170(3):602–610.
- [Holmberg et al., 2013] Holmberg, K., Siilasto, R., Laitinen, T., Andersson, P., and Jäsberg, A. (2013). Global energy consumption due to friction in paper machines. *Tribology International*, 62:58–77.
- [J.S.Guasumba, 2004] J.S.Guasumba (2004). Método para la generación transferencia y aprovechamiento de la alta energía calórica producida por el rozamiento deslizante en capa semisólida de bronce. *Revista Ciencia Quito-Ecuador*.
- [Kchaou et al., 2013] Kchaou, M., Sellami, A., Elleuch, R., and Singh, H. (2013). Friction characteristics of a brake friction material under different braking conditions. *Materials & Design*, 52:533–540.
- [Küçükömeroğlu and Kara, 2014] Küçükömeroğlu, T. and Kara, L. (2014). The friction and wear properties of cuzn39pb3 alloys under atmospheric and vacuum conditions. *Wear*, 309(1):21–28.
- [Kumar and Mullick, 2010] Kumar, S. and Mullick, S. (2010). Wind heat transfer coefficient in solar collectors in outdoor conditions. *Solar Energy*, 84(6):956–963.
- [Ladas, 2014] Ladas, D. (2014). *Wind effects on the performance of solar collectors on roofs*. PhD thesis, Concordia University.
- [Lidia Cepeda, 2013] Lidia Cepeda, A. N. (2013). Automatización de la observación metalográfica de las microestructuras de los materiales mediante la aplicación de labview. Master's thesis, Escuela Superior Politécnica de Chimborazo.
- [Luis Soriano, 2012] Luis Soriano, F. M. (2012). Metodología de ensayos para determinar la vida de una herramienta de corte bajo criterio de desgaste por medio de la ecuación de taylor en un proceso de mecanizado para el acero aisi 01 en un torno cnc. Master's thesis, Escuela Superior Politécnica del Litoral.
- [Mills and de Régules Ruiz-Funes, 1995] Mills, A. F. and de Régules Ruiz-Funes, S. (1995). *Transferencia de calor*. Irwin Madrid, Spain.
- [Nacional,] Nacional, U. T. Metalografía y tratamientos térmicos- material didáctico. http://www.frro.utn.edu.ar/repositorio/catedras/mecanica/5_anio/metalografia/10-Temple_y_Revenido_v2.pdf[Citado el 18/02/2016].

- [Narváez, 2011] Narváez, C. P. (2011). Análisis de tensiones térmicas dentro del rango elástico para sólidos con comportamiento lienal e isotrópico mediante el método de los elementos finitos. Master's thesis, Escuela Politécnica del Ejército.
- [Panana, 2009] Panana, A. E. (2009). *Texto Universitario: Transferencia de Calor*. Universidad Nacional del Callao.
- [Reed and Mikesell, 1967] Reed, R. P. and Mikesell, R. P. (1967). Low-temperature mechanical properties of copper and selected copper alloys. page 5.
- [Rodríguez, 2014] Rodríguez, A. G. (2014). Elemento amovibles y fijos no estructurales , tema 8: Aceros. <https://alexgarbi93.wordpress.com/2014/02/03/tema-8-aceros/>[Citado el 18/02/2016].
- [Sato et al., 2001] Sato, Y. S., Park, S. H. C., and Kokawa, H. (2001). Microstructural factors governing hardness in friction-stir welds of solid-solution-hardened al alloys. *Metallurgical and Materials Transactions A*, 32(12):3033–3042.
- [Testo, 2001] Testo (2001). Tabla de emisividades. https://www.testo.com.ar/es/home/formacion/curso_online_de_termografia_/tabla_de_emisividades/3_1__emissivity_table_mastercontent.jsp[Citado el 18/02/2016].
- [Tieu et al., 2006] Tieu, A., Kosasih, P. B., and Godbole, A. (2006). A thermal analysis of strip-rolling in mixed-film lubrication with o/w emulsions. *Tribology International*, 39(12):1591–1600.
- [Uddeholm, 2002] Uddeholm (2002). Arne df2, acero para trabajo en frio. <http://www.acerosuddeholm.com/spanish/files/ARNE.pdf>[Citado el 18/02/2016].
- [Wadeson et al., 2006] Wadeson, D., Zhou, X., Thompson, G., Skeldon, P., Oosterkamp, L. D., and Scamans, G. (2006). Corrosion behaviour of friction stir welded aa7108 t79 aluminium alloy. *Corrosion Science*, 48(4):887–897.
- [Xiao and Zhu, 2010] Xiao, G. and Zhu, Z. (2010). Friction materials development by using doe/rsm and artificial neural network. *Tribology International*, 43(1):218–227.