



EDUCACIÓN
SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



Instituto Tecnológico de San Luis Potosí

SAN LUIS POTOSÍ. S.L.P. 03/FEBRERO/2021

SECCIÓN: DIV. ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN
OFICIO: D.E.P.I. /002
ASUNTO: AUTORIZACIÓN DE IMPRESIÓN.

ING. JUAN COMPEÁN RODRÍGUEZ
ALUMNO DEL PROGRAMA DE MAESTRÍA EN ING. MECÁNICA
PRESENTE.

El que suscribe, Jefe de la División de Estudios de Posgrado e Investigación, por este medio me permito comunicar a Usted que se autoriza la impresión de su trabajo de tesis titulado: "ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN COMO FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA EN PROBETAS DE ALEACIÓN DE ALUMINIO 6061", para que con ello pueda usted continuar con los trámites para la obtención de su grado de Maestro en Ingeniería Mecánica.

Lo anterior de conformidad con el dictamen emitido favorablemente por los integrantes del H. Jurado Revisor, integrado por:

DR. PEDRO DE JESÚS GARCÍA ZUGASTI
Presidente
DRA. MARÍA LISSETH FLORES CEDILLO
secretario
M.I. ENRIQUE ALEJANDRO VÁZQUEZ HERNÁNDEZ
Vocal Propietario
DR. ARIEL BENJAMÍN DE LA ROSA ZAPATA
Vocal Suplente

ATENTAMENTE.

"CON TECNOLOGÍA Y ESPÍRITU UNA PATRIA FORJARÉ" ®



Instituto Tecnológico de San Luis Potosí

DR. ARIEL BENJAMÍN DE LA ROSA ZAPATA
JEFE DEL DEPTO. DE LA DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE
POSGRADO E INVESTIGACIÓN DEL ITSLP.

DEPARTAMENTO DE LA DIVISIÓN
DE ESTUDIOS DE POSGRADO
E INVESTIGACIÓN

C.C.P. ARCHIVO



Av. Tecnológico S/N Col. Unidad Ponciano
Arriaga, C.P. 78437 Soledad de Graciano Sánchez,
S.L.P.; Tel. (444) 818.21.36, 804.76.00 e-mail:
direccion@slp.tecnm.mx





EDUCACIÓN

SECRETARÍA DE EDUCACIÓN PÚBLICA



TECNOLÓGICO
NACIONAL DE MÉXICO



**INSTITUTO TECNOLÓGICO DE SAN LUIS POTOSÍ
DIVISIÓN DE ESTUDIOS DE POSGRADO E INVESTIGACIÓN**

MAESTRÍA EN INGENIERÍA MECÁNICA

TESIS

TÍTULO DEL TRABAJO:

**“ESTUDIO EXPERIMENTAL DE ESFUERZO-DEFORMACIÓN COMO
FUNCIÓN DE LA TEMPERATURA EN PROBETAS DE ALEACIÓN
DE ALUMINIO 6061”**

NOMBRE DEL ALUMNO:

I.M.E. JUAN COMPEÁN RODRÍGUEZ

ASESOR INTERNO:

Dr. PEDRO DE JESÚS GARCÍA ZUGASTI

ASESOR EXTERNO:

Dr. FRANCISCO OVIEDO TOLENTINO

Soledad de Graciano Sánchez; S.L.P. Febrero de 2021.

Agradecimientos

A Dios por permitirme seguir adelante.

A mis queridos padres, Joel Compeán y Ma. de los Ángeles Rodríguez por creer en mí y apoyarme en cada uno de mis sueños.

Al Tecnológico por darme la oportunidad de concluir mis estudios de posgrado y brindarme una gran etapa de mi vida.

A Margarita, por su cariño y apoyo.

A mis asesores, el Dr. Oviedo, que, sin su apoyo y visión, este proyecto no hubiera sido posible, y al Dr. Zugasti, que siempre me apoyó en el transcurso de estudio en el posgrado.

Al Dr. Mitzuo por permitirme utilizar su laboratorio de pruebas mecánicas.

Al M.I. Enrique por abrirme las puertas para continuar mis estudios.

A la Dra. Lisseth por apoyarme en la redacción de la tesis.

Al ing. Oscar Noyola, que me apoyó en la fabricación de las probetas.

A mi amigo el ing. José Luis García por apoyarme en la instrumentación.

A mis amigos Elena y Carlos con los cuales conviví en el posgrado.

A mi amigo Amadeo por apoyarme en la realización de los experimentos.

A Cuéllar, que me apoyó en la realización de las pruebas de tensión.

Al Ing. Sergio Rodríguez del laboratorio de electricidad del ITSLP.

Índice general

Capítulo 1. Introducción	1
1.1. Introducción	1
1.2. Antecedentes	2
1.3. Definición del problema	3
1.4. Justificación	5
1.5. Objetivos	6
1.5.1. Objetivo general	6
1.5.2. Objetivos específicos	6
1.6. Alcances	7
1.7. Limitaciones	7
1.8. Hipótesis	8
Capítulo 2. Marco teórico	9
2.1. Máquina universal de pruebas mecánicas	9
2.2. Probeta de ensayo de tracción	10
2.3. Ensayo de tensión	12
2.3.1. Diagrama esfuerzo-deformación	13
2.3.2. Propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de tensión y del diagrama esfuerzo-deformación.....	14
2.4. Transferencia de calor	18
2.4.1. Conducción	19
2.4.2. Convección	20
2.4.3. Radiación	22
2.4.4. Conducción de calor en régimen transitorio	23
2.5. Transformador	27
2.5.1. El transformador ideal	28
2.6. Placa Arduino	29
2.6.1. Funciones generales de Arduino	29
2.6.2. Arduino Uno	31
2.6.3. Arduino Mega 2560	31

2.6.4. Arduino Micro	32
Capítulo 3. Desarrollo.....	33
3.1. Maquinado de probetas	34
3.2. Propuestas de métodos de calentamiento.....	34
3.2.1. Calentamiento mediante el uso de un transformador eléctrico monofásico	35
3.2.2. Calentamiento mediante el uso de una resistencia eléctrica de Nicromo	36
3.2.3. Parrilla de gas licuado a presión	37
3.3. Sensores y circuitos electrónicos para mediciones y adquisición de datos	38
3.3.1. Circuito electrónico para el prototipo de calentamiento para el transformador eléctrico.....	38
3.3.2. Circuito electrónico para el prototipo de calentamiento por resistencia eléctrica de Nicromo.....	40
3.3.3. Circuito electrónico para el prototipo de calentamiento mediante parrilla de gas licuado a presión (L.P.).....	41
3.4. Construcción de los prototipos.....	43
3.4.1. Prototipo de calentamiento para el transformador eléctrico	43
3.4.2. Prototipo de calentamiento por resistencia eléctrica de Nicromo	44
3.4.3. Prototipo de calentamiento mediante parrilla de gas L.P.	46
3.5. Metodología para los ensayos de calentamiento	47
3.5.1. Método experimental para el calentamiento utilizando un transformador monofásico.....	47
3.5.2. Calentamiento utilizando resistencia eléctrica de Nicromo	49
3.5.3. Calentamiento mediante parrilla de gas	51
Capítulo 4. Resultados	55
4.1. Resultados de calentamiento mediante un transformador monofásico	55
4.2. Resultados de calentamiento mediante resistencia eléctrica de Ni-Cr	56
4.3. Resultados de calentamiento mediante parrilla de gas L.P.	58
4.4. Resultados de calentamiento para las pruebas de tensión.....	63
4.5. Resultados de las pruebas de tensión	67
Capítulo 5. Conclusiones	69
Bibliografía	70

Índice de figuras

Figura 2.1: Máquina universal de ensayo de tracción. [12]	10
Figura 2.2: Probeta típica de tensión. [11].....	10
Figura 2.3: Sistemas para sujeción de probetas. Para especímenes redondos, estos incluyen agarres roscados (a), cuñas dentadas (b) y, para especímenes con extremos a tope, collares divididos limitados por un collar sólido (c). Las muestras de lámina pueden sujetarse con pasadores (d) o cuñas dentadas. [11].....	11
Figura 2.4: Esquema de una máquina para ensayos de tracción. [14].....	12
Figura 2.5: Curva esfuerzo-deformación ingenieril correspondiente a una aleación de aluminio. [14].....	14
Figura 2.6: Límite elástico. [17]	15
Figura 2.7: Modos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. [19]	18
Figura 2.8: a) Construcción de un transformador tipo acorazado. b) Transformador convencional tipo acorazado [22]	27
Figura 2.9: a) Dibujo de un transformador ideal. b) Símbolos esquemáticos de un transformador. A veces el núcleo de hierro se muestra en el símbolo y a veces no. [22]	29
Figura 2.10: Componentes de Arduino uno. [24].....	30
Figura 2.11: Arduino Mega. [25]	31
Figura 2.12: Arduino micro. [26]	32
Figura 3.1: Diagrama de flujo de tesis.....	33
Figura 3.2: Probetas maquinadas de aluminio 6061	34
Figura 3.3: Propuesta de diseño de calentamiento mediante el uso de transformador eléctrico monofásico. Software: Solidworks®. Fuente: Elaboración propia	35
Figura 3.4: Propuesta de diseño de calentamiento por resistencia de Ni-Cr. Software: Solidworks®. Fuente: Elaboración propia	36
Figura 3.5: Propuesta de diseño de calentamiento mediante el uso de una parrilla de gas LP. Software: Solidworks®. Fuente: Elaboración propia	37
Figura 3.6: Esquema de circuito para la adquisición de datos del prototipo 1, donde: a) Arduino uno, b) módulo Max 6675, c) termopar tipo K, d) módulo MLX90614, e) sensor SCT-013, f) circuito integrado LM358, g) módulo ZMPT101B. Software: Fritzing®. Fuente: Elaboración propia	39
Figura 3.7: Esquema de circuito para la adquisición de datos del prototipo 2, donde: a) Arduino mega, b) módulo Max 6675, c) termopar tipo K, d) módulo relevador, e) regulador de voltaje, f) módulo ACS712, g) módulo ZMPT101B, h) resistencia de Ni-Cr. Software: Fritzing®. Fuente: Elaboración propia	41
Figura 3.8: Esquema de circuito para la adquisición de datos del prototipo 3, donde: a) Arduino mega, b) módulo Max 6675, c) termopar tipo K. Software: Fritzing®. Fuente: Elaboración propia	42
Figura 3.9: Prototipo de calentamiento mediante transformador.....	44

Figura 3.10: Prototipo de pruebas de calentamiento mediante resistencia eléctrica	45
Figura 3.11: Prototipo de calentamiento mediante parrilla de gas en durante el experimento.....	47
Figura 3.12: Ubicación de sensores en la probeta para pruebas de calentamiento, unidades (mm). Fuente: Elaboración propia.....	48
Figura 3.13. Probeta sujeta por los caimanes, donde se aprecian los termopares y el sensor de temperatura infrarrojo.....	48
Figura 3.14. Ubicación de termopares, unidades (mm). Fuente: Elaboración propia.	50
Figura 3.15. Probeta montada dentro del cerámico, donde se pueden apreciar los cables de los termopares utilizados	50
Figura 3.16. Ubicación de termopares en la probeta, unidades (mm).....	53
Figura 3.17. Probeta con los tres termopares sobre su superficie	53
Figura 4.1. Calentamiento con transformador	56
Figura 4.2. Curvas de calentamiento a diferentes temperaturas desde 100 °C a 400 °C	58
Figura 4.3. Curvas de calentamiento con una masa de arena de 0.5 kg	59
Figura 4.4. Curvas de calentamiento con una masa de arena de 1.0 kg	60
Figura 4.5. Curvas de calentamiento con una masa de arena de 1.25	60
Figura 4.6. Curva de calentamiento para una masa de 1.0 kg y una apertura de potencia de 50%.....	64
Figura 4.7. Curva de calentamiento para una masa de 1.0 kg y una apertura de potencia de 75%.....	64
Figura 4.8. Curva de calentamiento para una masa de 1.25 kg y una apertura de potencia de 75%.....	65
Figura 4.9. Probetas después de las pruebas de tensión	65
Figura 4.10. Curvas esfuerzo-deformación a diversas temperaturas, obtenidas de ensayos de tensión	67

Índice de tablas

Tabla 2.1. Valores típicos a temperatura ambiente de las constantes elásticas para materiales isotrópicos. [16].....	15
Tabla 2.2: Conductividades térmicas de algunos metales, sólidos no metálicos, líquidos y gases. [18].....	20
Tabla 2.3: Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección. [20]	21
Tabla 2.4: Emisividades de algunos materiales a 300 K. [20]	23
Tabla 3.1. Matriz de experimentos de casos para prototipo 2	51
Tabla 3.2. Matriz de experimentos de casos para prototipo de calentamiento 3... 54	
Tabla 4.1. Resultados de calentamiento utilizando un transformador	55
Tabla 4.2. Resultados obtenidos de calentamiento mediante prototipo 2	57
Tabla 4.3. Tabla de propiedades físicas de la probeta	58
Tabla 4.4. Datos obtenidos de calentamiento mediante parrilla de gas	61
Tabla 4.5. Datos obtenidos de enfriamiento a temperatura ambiente para el método 3	62
Tabla 4.6. Datos de calentamiento mediante parrilla de gas para pruebas de tensión	66
Tabla 4.7. Propiedades mecánicas obtenidas de las pruebas de tensión a diferentes temperaturas para el aluminio 6061	68

Capítulo 1. Introducción

1.1. Introducción

Las regulaciones en seguridad y eficiencia de combustible obligan a la industria automotriz a buscar cada vez nuevos materiales y procesos innovadores para reducción del peso final del vehículo [1]. Los problemas ambientales de la actualidad exigen una mayor sustentabilidad en el sector industrial, que incluya la reducción de consumo de combustible y sus emisiones, pero también el uso de materiales reciclables, por lo tanto, la industria automotriz está examinando nuevos materiales y estrategias de fabricación que permitan reducir el peso de componentes, y a la vez aumentar su resistencia y seguridad de los vehículos. La reducción del peso de los automóviles es crucial para reducir el consumo de combustible y sus emisiones, debido a estos factores las aleaciones de aluminio proveen una alta resistencia a la corrosión y una alta tasa de reciclaje, lo cual conduce a una creciente demanda de las aleaciones de aluminio debido a sus aplicaciones para vehículos más ligeros, dentro de estas aleaciones de aluminio las tratadas con calor proporcionan una resistencia adicional, a causa del endurecimiento precipitado después de las operaciones de formado, lo cual es una ventaja en comparación a las aleaciones de aluminio no tratadas térmicamente [2]. Sin embargo, las aleaciones de aluminio presentan una baja conformabilidad y recuperación del material que no es despreciable en los procesos de conformado a temperatura ambiente. Una temperatura tibia, por debajo de la temperatura de recristalización del material, aumenta la capacidad de la lámina de metal para ser deformada de manera deseable con baja recuperación elástica. La investigación sobre este tema tiene una gran relevancia para la industria y se ha centrado en: el diseño de herramientas de conformado en caliente [3], el desarrollo de alternativas de formado en caliente [4], la mejora de algoritmos de análisis por elemento finito termo- mecánicos [5], y la caracterización y modelado del comportamiento mecánico a temperaturas tibias [6].

1.2. Antecedentes

En el pasado, el estampado en caliente de acero era un proceso complicado y a menudo considerado "exótico", aunque ahora es usado ampliamente en la industria automotriz además de que para algunos componentes de seguridad se vuelve obligatorio; las piezas estampadas en caliente son usadas donde es requerido un esfuerzo muy alto, aunque para algunas aplicaciones también es necesario incorporar ductilidad en algunas zonas para guiar la absorción de energía bajo una carga de impacto; para otras aplicaciones, el grosor del material debe reducirse suavemente debido a que se requiere que sea de peso ligero esto se logra adaptando las propiedades del material dentro del componente. Esta nueva generación de piezas conformadas en caliente ya es un estándar en el mercado, pero aun así es un reto en de ingeniería. El siguiente desafío ya está en posición de inicio, el cual es el conformado en caliente de aluminio, el cual está planeado como una sustitución de los aceros más pesados para piezas estructurales, pero recientemente también para paneles exteriores, donde deben cumplir con todos los requisitos en las partes visibles. Es necesario un formado ligero, fuerte, preciso, de alta calidad para mejorar la formabilidad del material [1].

Taylan Altan y Ju Long en 2015 [7], reportaron que la formación de aluminio a temperaturas elevadas es una tendencia tecnológica muy reciente, para alcanzar soluciones livianas y superar los problemas típicos relacionados con el formado convencional de aluminio a temperatura ambiente, como la limitada formabilidad la cual deriva en una reducida complejidad geométrica y una recuperación de forma del material en la parte final.

De acuerdo a los trabajos de investigación de Simoes y otros en 2019 [8], reportaron que la velocidad de perforación tiene gran influencia en el éxito del formado en caliente de placas de metal de aleaciones de aluminio, particularmente en la

geometría final de la pieza y en el comportamiento de servicio, Sin embargo, este parámetro no ha sido muy analizado en la literatura. Adicionalmente, en las aleaciones de aluminio con tratamientos térmicos de formado en tibio bajo condiciones no isotérmicas, no se ha informado de ningún estudio sobre la influencia de la velocidad de inserción en la recuperación del material, Simoes estudió dos aleaciones de aluminio Al-Mg-Si con tratamiento térmico (EN AW 6016-T4 and EN AW 6061-T6) entre 22 °C y 200 °C, mediante pruebas de tensión y pruebas de seguidor de formado de copa cilíndrica por división de anillo (recuperación de forma), concluyó que en el conformado en caliente el aumento de velocidad es ventajoso, debido a que la formabilidad y la recuperación elásticas se mantienen estables [8].

Zhengyang Cai y colaboradores [9], examinaron los comportamientos termomecánicos de una lámina de acero de fase dual (DF) con temperaturas de formado en tibio (20-190 °C), tomaron en cuenta el efecto de envejecimiento por fuerzas dinámicas del material el cual fue observado a través de pruebas de tensión térmicas uniaxiales y establecieron una función de esfuerzo de flujo dependiente de la temperatura, también utilizaron el concepto de contorno de trabajo plástico en pruebas de tensión biaxiales, los resultados de Zhengyang Cai y otros, indicaron que la temperatura es un factor de impacto nada despreciable en ambos ejes de comportamientos: a) de endurecimiento de flujo de esfuerzo y b) en el comportamiento de cedencia plástico de la chapa metálica.

1.3. Definición del problema

La industria metal-mecánica se considera como un indicador de referencia de la industria manufacturera, representa una actividad estratégica para el desarrollo económico de San Luis Potosí, debido a que es el principal sector industrial en el Estado, por las remuneraciones económicas que genera, formación de capital y valor que agrega a sus productos. La Industria Manufacturera de San Luis Potosí

representa el 25.4 % del Producto Interno Bruto (PIB) Estatal. La industria metal-mecánica contribuye con el 50.9 % del PIB de la industria manufacturera.

Desde 2016, el crecimiento promedio del estado potosino ha sido de 4.4 %, superior al 2.5 % de la media nacional. En 2018, la entidad se erigió como la segunda economía más dinámica de México con un crecimiento del 7.6 %, superior al de países como E.U.A. (2.9 %), Canadá (2.1 %) y Brasil (1.8 %). El titular de SEDECO (Secretaría de Desarrollo Económico) indica que la tierra potosina también destaca por su sector secundario (industria, manufactura) al ubicarse en el segundo lugar en crecimiento a nivel nacional en este rubro, con una tasa de 13.8 %, la tierra potosina también destaca por su sector secundario (industria, manufactura) al ubicarse en el segundo lugar en crecimiento a nivel nacional en este rubro, con una tasa de 13.8 %. El sector automotriz en la entidad potosina se ha constituido como un pilar fundamental en el desarrollo económico potosino. Pese a su reciente inmersión en esta industria, que data de 2008, la entidad es una de las más pujantes: en la actualidad, cuenta con 231 compañías automotrices (dos plantas armadoras, BMW y GM, y 229 empresas proveedoras del sector), las cuales son fuente de empleo para 82,000 personas [10].

Debido a que a nivel regional San Luis Potosí cuenta con un gran número de Industrias en el sector metal-mecánico, muchos de los procesos industriales de formado de metal, se basan en rolado, estampado, actualmente estos procesos se llevan a cabo con trabajo en frío, el presente trabajo pretende contribuir con un método experimental de calentamiento alterno para la caracterización del aluminio 6061 a altas temperaturas por debajo del punto de recristalización, lo cual favorecerá a los procesos de formado de lámina, incrementando la eficiencia y reduciendo costos de fabricación.

1.4. Justificación

En la actualidad en la industria metal-mecánica, más específicamente en la industria automotriz, se están incorporando nuevos procesos de fabricación que incluyen el formado en tibio, lo que significa que se realizan procesos de manufactura como el rolado, embutido y doblado de láminas de metal, entre otros, incrementando la temperatura controladamente por debajo del punto de recristalización de la pieza a deformar mecánicamente, lo cual brinda beneficios como: ahorro en energía para deformar y un incremento en la maquinabilidad de la pieza, con lo que se generan ahorros económicos para la industria automotriz, así como al utilizar menos energía se contribuye a generar un menor número de emisiones de gases contaminantes a la atmósfera.

La realización de este trabajo sirve para ampliar la base de datos de curvas esfuerzo-deformación ingenieril del aluminio 6061 a altas temperaturas por debajo del punto de recristalización, además de contribuir con un método de calentamiento de bajo costo que pueda ser utilizado en laboratorios donde no se cuenta con cámaras de control de temperatura.

El obtener curvas esfuerzo-deformación ingenieril a distintos rangos de temperaturas por debajo de la recristalización ayuda a los diseñadores e investigadores a mejorar los cálculos de los diseños, con las cuales se puedan realizar simulaciones virtuales (con programas de computadora basados en el Método del Elemento Finito) más cercanas a los procesos reales, y utilizar materiales de menor costo cuyas propiedades se mejoran por el incremento de temperatura.

Las implicaciones que podrían tener los resultados de este trabajo son: la mejora de los procesos de fabricación a temperaturas altas, pero por debajo del punto de

recristalización, un mejor conocimiento de los materiales y sus propiedades mecánicas a temperatura altas, con lo cual también se mejoran los diseños de los equipos utilizados en los procesos de formado en caliente como embutido, estampado, rolado entre otros.

1.5. Objetivos

1.5.1. Objetivo general

Diseñar un método experimental para poder caracterizar probetas de aluminio 6061 a temperaturas superiores a la del ambiente por debajo de su punto de recristalización mediante pruebas de tensión en una máquina universal.

1.5.2. Objetivos específicos

- Proponer al menos 3 métodos para calentamiento de probetas para pruebas de tensión en máquina universal.
- Maquinar probetas para pruebas de tensión con base en la Norma ASTM-E8.
- Seleccionar sensores para medir los parámetros para cada propuesta de calentamiento.
- Programar los sensores en el microcontrolador Arduino.
- Seleccionar materiales para la construcción de cada uno de los métodos de calentamiento propuestos.
- Construir prototipos para calentar probetas.
- Realizar pruebas experimentales con cada método de calentamiento propuesto para verificar el funcionamiento, eficacia y dificultades.
- Elegir el mejor método según las necesidades de calentamiento utilizando un sistema de toma de decisiones.

- Realizar el modelo matemático de calentamiento de la probeta para el método experimental de calentamiento seleccionado, mediante el uso de las ecuaciones de transferencia de calor.
- Proponer el diseño de experimentos para seleccionar los parámetros a variar y obtener el número de pruebas a realizar.
- Realizar pruebas de tensión en máquina universal a las temperaturas propuestas en el diseño de experimentos para obtener las curvas de esfuerzo- deformación ingenieril.
- Evaluar y comparar los resultados obtenidos.

1.6. Alcances

Con los resultados de este trabajo, se contribuirá con una base de datos de curvas de esfuerzo-deformación ingenieril y temperatura-tiempo de calentamiento, para la caracterización del aluminio 6061 sometido a un rango de temperaturas de 100 a 320 °C mediante el uso de un método experimental de calentamiento de la probeta en las pruebas de tensión en una máquina universal.

1.7. Limitaciones

- La máquina universal de pruebas de tensión Instron utilizada en el laboratorio de Ingeniería Mecánica del Instituto Tecnológico de San Luis Potosí es un modelo antiguo de aproximadamente 50 años, la cual utilizando una hoja de papel milimétrico genera las curvas esfuerzo- deformación, además de que no se encuentra graduada ni calibrada.
- El tamaño de muestra de las probetas de aluminio 6061 está limitado por los precios de maquinado.

- La fiabilidad y calibración de los sensores a utilizar se encuentra limitada debido a que son módulos de sensores para Arduino y son de bajo precio por lo que cuentan con un margen de error y confiabilidad.
- El rango de temperatura durante la prueba de tensión es variable debido a que es un método experimental y depende de la sincronización del usuario para colocar la probeta en el tiempo preciso en la máquina universal como el tiempo de espera y las pérdidas de calor durante la prueba.

1.8. Hipótesis

Es posible encontrar un método óptimo de calentamiento controlado para poder trabajar el aluminio 6061 a mayor temperatura, disminuyendo el esfuerzo y aumentando su ductilidad.

Capítulo 2. Marco teórico

2.1. Máquina universal de pruebas mecánicas

Las máquinas de prueba más comunes son las de ensayo universales, que prueban materiales en tensión, compresión o flexión. Su función principal es crear la curva de tensión. Las máquinas de prueba pueden ser electromecánicas o hidráulicas. La principal diferencia es el método por el cual se aplica la carga.

Las máquinas electromecánicas se basan en un motor eléctrico de velocidad variable; un sistema de reducción de engranajes; y uno, dos o cuatro tornillos que mueven la cruceta hacia arriba o hacia abajo. Este movimiento carga la muestra en tensión o compresión. La velocidad de la cruceta se puede cambiar cambiando la velocidad del motor. Se puede implementar un sistema de circuito cerrado basado en microprocesador para controlar con precisión la velocidad de la cruceta.

Las máquinas de prueba hidráulicas se basan en un pistón de simple efecto o doble que mueve la cruceta hacia arriba o hacia abajo. Sin embargo, la mayoría de las máquinas de prueba hidráulicas estáticas tienen un pistón o pistón de acción simple.

En una máquina conducida manualmente, el operador ajusta el orificio de una válvula de aguja con compensación de presión para controlar la velocidad de carga.

En un servo sistema hidráulico de circuito cerrado, la válvula de aguja se reemplaza por una servoválvula de accionamiento eléctrico para un control preciso [11]. La Figura 2.1 muestra una máquina universal de pruebas de tensión.



Figura 2.1: Máquina universal de ensayo de tracción. [12]

2.2. Probeta de ensayo de tracción

Considere la probeta de tracción típica que se muestra en la Figura 2.2, la cual posee los extremos agrandados para la sujeción con las mordazas. El área de la sección transversal se reduce con respecto al resto del espécimen, de modo que la deformación y la falla se localizarán en esta región. La longitud del indicador (o gage en inglés) es la región sobre la cual se realizan las mediciones y se centra en la sección reducida.

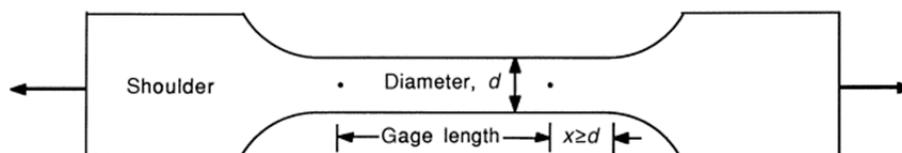


Figura 2.2: Probeta típica de tensión. [11]

Las distancias entre los extremos de la sección del medidor y los hombros deben ser lo suficientemente grandes como para que los extremos más grandes no limiten la deformación dentro de la sección calibrada, y la longitud del medidor debe ser más grande en relación a su diámetro. De lo contrario el rango de esfuerzo será más complejo que la tensión simple. La Figura 2.3 muestra diversas formas de sujeción de probetas.

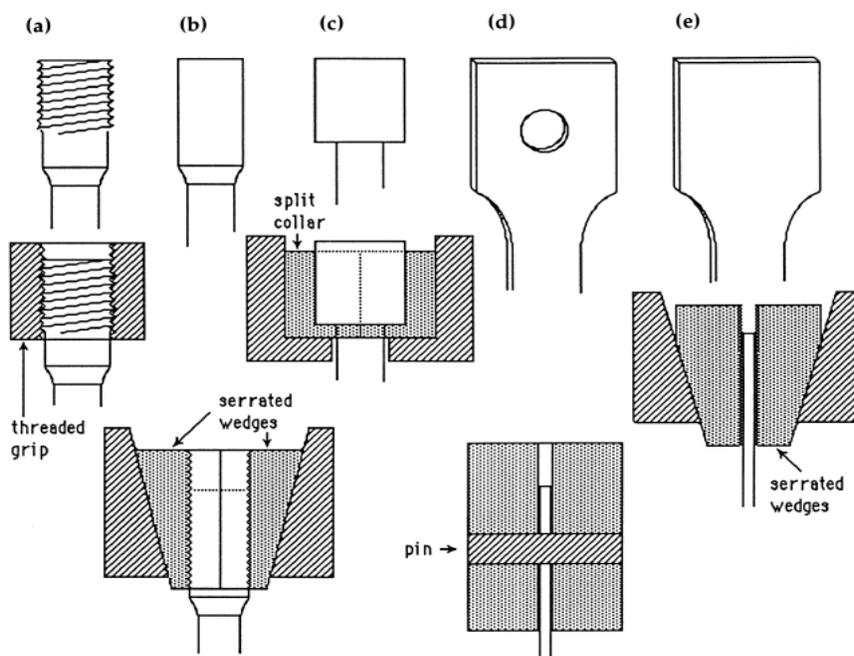


Figura 2.3: Sistemas para sujeción de probetas. Para especímenes redondos, estos incluyen agarres roscados (a), cuñas dentadas (b) y, para especímenes con extremos a tope, collares divididos limitados por un collar sólido (c). Las muestras de lámina pueden sujetarse con pasadores (d) o cuñas dentadas. [11]

La consideración más importante en la selección de un método de sujeción es asegurar que la muestra pueda mantenerse a la carga máxima sin deslizamiento o falla en la sección de agarre. La flexión debe ser minimizada [11].

2.3. Ensayo de tensión

Se utiliza principalmente para determinar la relación entre el esfuerzo normal promedio y la deformación normal promedio en muchos materiales de ingeniería como metales, cerámicas, polímeros y materiales compuestos.

Para realizar un ensayo de tensión o compresión, se fabrica una probeta del material con forma y tamaño “estándar”. La probeta tiene una sección transversal circular constante con extremos más grandes, de modo que la falla no se produzca en las empuñaduras. Antes de realizar el ensayo, con la ayuda de un punzón, se hacen dos pequeñas marcas sobre la longitud uniforme de la probeta. Se hacen mediciones tanto del área de la sección transversal inicial de la probeta, A_0 , como de la longitud calibrada L_0 entre las marcas. Después se utiliza una máquina de ensayos como la que aparece en la siguiente figura para estirar la probeta a una velocidad lenta y constante hasta que ésta falla. La máquina está diseñada para leer la carga que se requiere para mantener este estiramiento uniforme [13]. En la Figura 2.4 se aprecia un esquema de una máquina de pruebas de tensión.

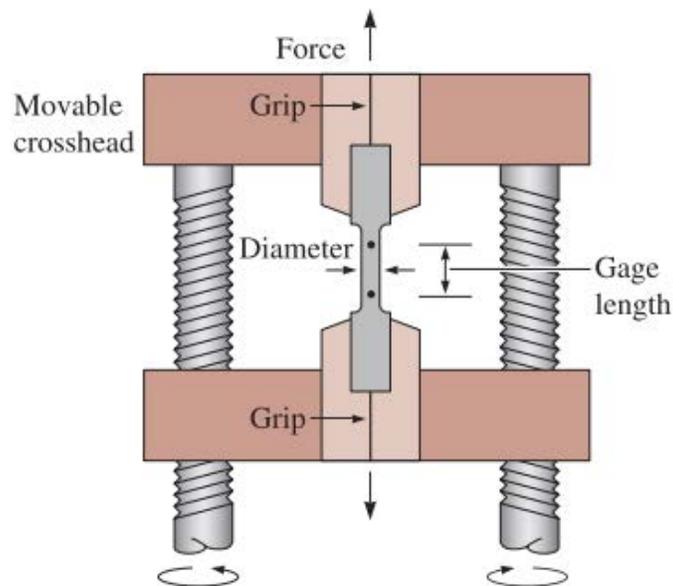


Figura 2.4: Esquema de una máquina para ensayos de tracción. [14]

2.3.1. Diagrama esfuerzo-deformación

Para obtener el diagrama de esfuerzo-deformación de un material, comúnmente se lleva a cabo un ensayo o prueba de tensión sobre una probeta del material.

El área de la sección transversal de la sección cilíndrica central de la probeta se ha determinado exactamente y se han hecho dos marcas de calibración en dicha porción a una separación de L_0 . La distancia L_0 se conoce como la longitud base de la probeta.

La probeta se coloca en la máquina de ensayo, que se usa para aplicar una carga centrada P . Al aumentar la carga P , también se incrementa la distancia L entre las dos marcas base de la probeta. La distancia L se mide con un indicador de carátula, y el alargamiento $\delta = L - L_0$ se registra para cada valor de P .

Para cada par de lecturas P y δ , el esfuerzo σ se calcula dividiendo P entre el área original de la sección transversal A_0 del espécimen, y la deformación unitaria dividiendo el alargamiento δ entre la distancia original L_0 entre las dos marcas base de la probeta. Puede ahora obtenerse el diagrama de esfuerzo-deformación graficando ϵ como la abscisa y σ como la ordenada [15]. La siguiente figura muestra un diagrama esfuerzo-deformación para una aleación de aluminio.

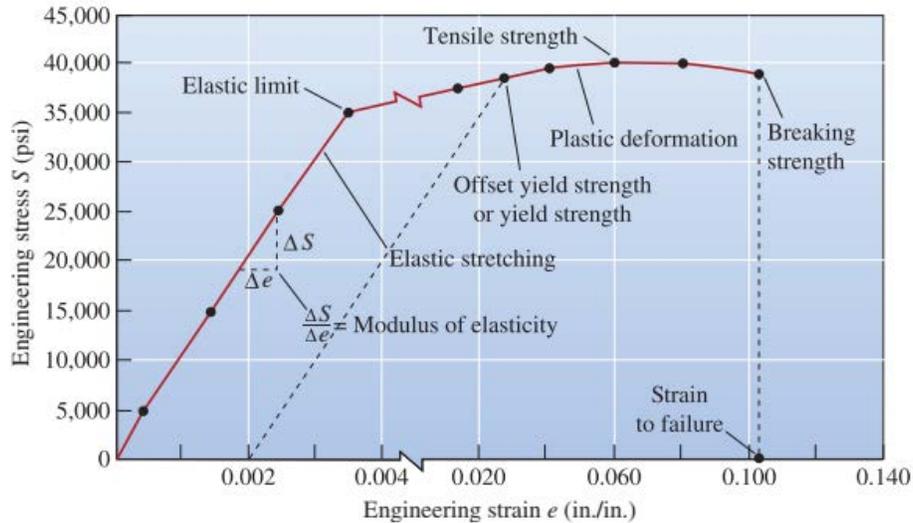


Figura 2.5: Curva esfuerzo-deformación ingenieril correspondiente a una aleación de aluminio. [14]

2.3.2. Propiedades mecánicas obtenidas del ensayo de tensión y del diagrama esfuerzo-deformación

- Módulo de elasticidad.** En la primera parte del ensayo de tensión el metal se deforma elásticamente. Esto si se elimina la carga sobre la muestra, volverá a su longitud inicial. Para metales, la máxima deformación elástica es usualmente menor al 0.5 %. En general los metales y las aleaciones muestran una relación lineal entre la tensión y la deformación en la región elástica en un diagrama tensión-deformación Que se describe mediante la ley de Hook, en la expresión mostrada a continuación.

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon} \quad (2.1)$$

Donde:

E es el módulo de elasticidad o módulo de Young

σ es el esfuerzo

ϵ es la deformación

El módulo de elasticidad está relacionado con la fuerza de enlace entre átomos de un metal o aleación. En la Tabla 1 se muestran los módulos elásticos de algunos metales comunes. Los metales con módulo elástico alto son relativamente rígidos y no se deforman fácilmente [12]. La Tabla 2.1 muestra los módulos de elasticidad de algunos materiales.

Tabla 2.1. Valores típicos a temperatura ambiente de las constantes elásticas para materiales isotrópicos. [16]

Material	Modulus of Elasticity, 10 ⁶ psi (GPa)	Shear Modulus, 10 ⁶ psi (GPa)	Poisson's Ratio
Aluminum alloys	10.5 (72.4)	4.0 (27.5)	0.31
Copper	16.0 (110)	6.0 (41.4)	0.33
Steel (plain carbon and low-alloy)	29.0 (200)	11.0 (75.8)	0.33
Stainless steel (18-8)	28.0 (193)	9.5 (65.6)	0.28
Titanium	17.0 (117)	6.5 (44.8)	0.31
Tungsten	58.0 (400)	22.8 (157)	0.27

- Límite elástico.** Se define mediante la intersección de la curva tensión-deformación con una recta, paralela al tramo elástico, que pase por el punto de deformación del 0.2 %. Es una indicación apropiada del inicio de la deformación plástica [17]. La Figura 2.6 muestra un ejemplo de donde se localiza el límite elástico en una curva tensión deformación.

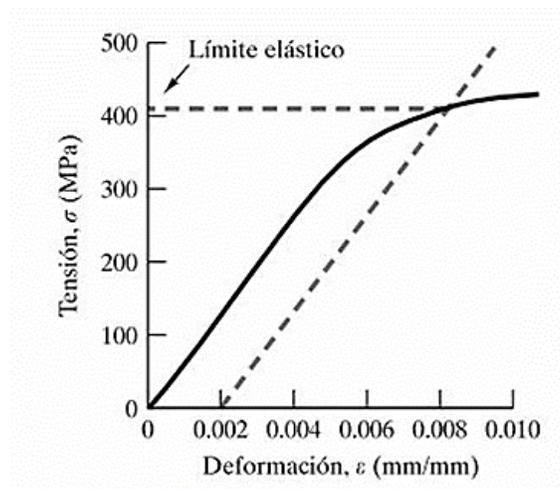


Figura 2.6: Límite elástico. [17]

- **Resistencia a la máxima tensión.** La resistencia a la máxima tensión es la tensión máxima alcanzada en la curva de tensión-deformación. Si la muestra desarrolla un decremento localizado en su sección, la tensión decrecerá al aumentar la deformación hasta que ocurra la fractura puesto que la tensión se determina usando la sección inicial de la muestra. A mayor ductilidad del metal, mayor será el decremento en la tensión en la curva tensión-deformación después de la tensión máxima.

La resistencia máxima a la tensión de un metal se determina dibujando una línea horizontal desde el punto máximo de la curva tensión-deformación hasta el eje de tensiones. La tensión a la que la línea intercepta al eje de tensión se denomina resistencia máxima a la tensión, o a veces simplemente resistencia a la tensión o tensión de fractura [12].

- **Razón de poisson.** Relaciona la deformación elástica longitudinal producida por un esfuerzo de tensión sencillo o un esfuerzo de compresión con la deformación lateral que ocurre de manera simultánea. Como se muestra en la siguiente ecuación.

$$v = \frac{-e_{lateral}}{e_{longitudinal}} \quad (2.2)$$

Donde:

v es la razón de poisson

$e_{lateral}$ es la deformación elástica lateral

$e_{longitudinal}$ es la deformación elástica longitudinal

- **Ductilidad.** Es la habilidad de un material a deformarse de manera permanente sin romperse cuando se aplica una fuerza. Existen dos medidas comunes de la ductilidad, la primera es midiendo el porcentaje de elongación que cuantifica la deformación plástica permanente en la falla, y la segunda forma de medir la

ductilidad es mediante el cambio porcentual en el área de la sección transversal [14].

- **Porcentaje de elongación.** La cantidad de elongación que presenta una muestra bajo tensión durante un ensayo y proporciona un valor de la ductilidad de un metal. La ductilidad de los metales comúnmente se expresa como un porcentaje de la elongación, comenzando con una longitud de calibración. En general, a mayor ductilidad (más deformable es el metal), mayor será el porcentaje de la elongación.

Durante el ensayo de tensión puede utilizarse un extensómetro para medir continuamente la deformación de la muestra que está siendo analizada. El porcentaje de elongación de una muestra después de la fractura puede medirse juntando la muestra fracturada y midiendo longitud final con un calibre. El porcentaje de elongación en la fractura es de importancia en ingeniería no sólo como una medida de la ductilidad, si no también es un índice de la calidad del metal. La ecuación siguiente se utiliza para calcular el porcentaje de elongación.

$$\% \text{ elongación} = \frac{L - L_0}{L_0} \times 100\% \quad (2.3)$$

Donde:

L_0 es la longitud entre las marcas de calibración en la muestra antes del ensayo

L es la longitud final de las marcas de calibración después del ensayo, al juntar las dos partes de la muestra

- **Porcentaje de reducción de área.** La ductilidad de un metal o aleación puede también expresarse en términos de la reducción en el área. Después de la prueba se mide el diámetro de la sección al fracturar. Utilizando la medida de los diámetros inicial y final, puede determinarse el porcentaje de reducción en el área a partir de la

$$\% \text{ reducción en área} = \frac{A_0 - A_f}{A_0} \times 100\% \quad (2.4)$$

Donde:

A_0 es el área inicial de la sección a fracturar

A_f es el área de fracturada después de la prueba

2.4. Transferencia de calor

La transferencia de calor se puede definir como la transmisión de energía de una región a otra como resultado de una diferencia de temperatura entre ellas [18]. Es la ciencia que trata de la determinación de las razones de las transferencias de energía. La transferencia de energía como calor siempre se produce del medio que tiene la temperatura más elevada hacia el de temperatura más baja, y la transferencia de calor se detiene cuando los dos medios alcanzan la misma temperatura.

El calor se puede transferir en tres modos diferentes: conducción, convección y radiación. Todos los modos de transferencia de calor requieren la existencia de una diferencia de temperatura y todos ellos ocurren del medio que posee la temperatura más elevada hacia uno de temperatura más baja.

La Figura 2.7 muestra los diferentes tipos de procesos de transferencia de calor.

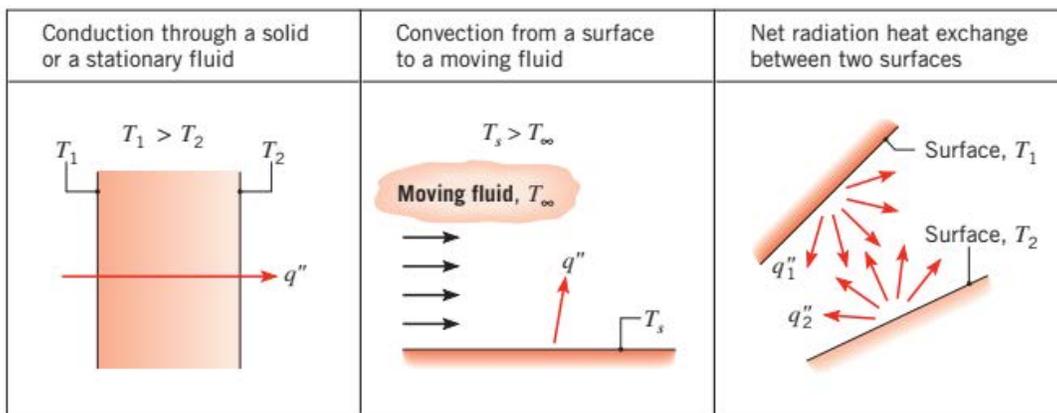


Figura 2.7: Modos de transferencia de calor: conducción, convección y radiación. [19]

2.4.1. Conducción

La conducción es la transferencia de energía de las partículas más energéticas de una sustancia hacia las adyacentes menos energéticas, como resultado de interacciones entre esas partículas. La conducción puede tener lugar en los sólidos, líquidos o gases. En los gases y líquidos la conducción se debe a las colisiones y a la difusión de las moléculas durante su movimiento aleatorio. En los sólidos se debe a la combinación de las vibraciones de las moléculas en una retícula y al transporte de energía por parte de los electrones libres.

la razón de la conducción de calor a través de una capa plana es proporcional a la diferencia de temperatura a través de ésta y al área de transferencia de calor, pero es inversamente proporcional al espesor de esa capa, como se puede observar en la siguiente ecuación, que se conoce como la ley de Fourier [20].

$$\dot{q}_{cond} = -k A \frac{dT}{dx} \quad (2.5)$$

Donde:

k es la conductividad térmica del material

A es el área unitaria perpendicular a la dirección de transferencia

dT/dx es el gradiente de temperatura la razón de cambio de T con respecto a x

La tabla mostrada a continuación contiene las órdenes de magnitud de la conductividad térmica de varios tipos de materiales.

Tabla 2.2: Conductividades térmicas de algunos metales, sólidos no metálicos, líquidos y gases. [18]

Material	Conductividad térmica a 300 K (540 °R)	
	W/m K	Btu/h ft °F
Cobre	399	231
Aluminio	237	137
Acero al carbono, 1% C	43	25
Vidrio	0.81	0.47
Plásticos	0.2–0.3	0.12–0.17
Agua	0.6	0.35
Etileno glicol	0.26	0.15
Aceite para motores	0.15	0.09
Freón (líquido)	0.07	0.04
Hidrogeno	0.18	0.10
Aire	0.026	0.02

2.4.2. Convección

El modo de transferencia de calor por convección en realidad consiste en dos mecanismos que operan de manera simultánea. El primero es la transferencia de energía generada por el movimiento molecular, es decir, el modo conductivo. Superpuesta a este modo se encuentra la transferencia de energía por el movimiento macroscópico de fracciones de fluido. El movimiento de fluido es un resultado de fracciones de fluido, donde cada una consiste en una gran cantidad de moléculas, que se mueven por la acción de una fuerza externa. Esta fuerza extraña puede ser el resultado de un gradiente de densidad, como en la convección natural, o por una diferencia de presión generada por una bomba o un ventilador, o posiblemente por una combinación de las dos [18]. A pesar de la complejidad de la convección, se observa que la rapidez de la transferencia de calor por convección es proporcional a la diferencia de temperatura y se expresa en forma conveniente por la ley de Newton del enfriamiento en la ecuación (2.6) .

$$Q_{conv} = h A_s (T_s - T_{\infty}) \quad (2.6)$$

Donde:

h es el coeficiente de transferencia de calor por convección

A_s es el área superficial

T_s es la temperatura de la superficie

T_∞ es la temperatura del fluido suficientemente alejado de esta superficie

El coeficiente de transferencia de calor por convección h no es una propiedad del fluido. Es un parámetro que se determina en forma experimental y cuyo valor depende de todas las variables que influyen sobre la convección, como la configuración geométrica de la superficie, la naturaleza del movimiento del fluido, las propiedades de éste y la velocidad masiva del mismo. En la siguiente tabla se dan valores típicos de h .

Tabla 2.3: Valores típicos del coeficiente de transferencia de calor por convección.

[20]

Tipo de convección	$h, \text{W/m}^2 \cdot ^\circ\text{C}^*$
Convección libre de gases	2-5
Convección libre de líquidos	10-1 000
Convección forzada de gases	25-250
Convección forzada de líquidos	50-20 000
Ebullición y condensación	2 500-100 000

2.4.3. Radiación

La radiación térmica es la energía emitida por la materia que se encuentra a una temperatura finita. Sin importar la forma de la materia, la radiación se puede atribuir a cambios en las configuraciones electrónicas de los átomos o moléculas constitutivos. La energía del campo de radiación es transportada por ondas electromagnéticas (o alternativamente fotones). Mientras la transferencia de energía por conducción o por convección requiere la presencia de un medio material, la radiación no lo precisa. La transferencia de radiación ocurre de manera más eficiente en el vacío [19].

La razón máxima de la radiación que se puede emitir desde una superficie a una temperatura termodinámica T_s (en K o R) es expresada por la ley de Stefan-Boltzmann como se muestra en la ecuación (2.7).

$$\dot{Q}_{rad} = \epsilon \sigma A_s (T_s^4 - T_{alred}^4) \quad (2.7)$$

Donde:

ϵ es la emisividad de la superficie

σ es la constante de Stefan-Boltzmann, que equivale a $5.67 \times 10^{-8} \text{ W/m}^2 \cdot \text{K}$

A_s es el área superficial

T_s es la temperatura de superficie

T_{alred} es la temperatura de los alrededores

En la Tabla 2.4 se dan las emisividades de algunas superficies.

Tabla 2.4: Emisividades de algunos materiales a 300 K. [20]

Material	Emisividad
Hoja de aluminio	0.07
Aluminio anodizado	0.82
Cobre pulido	0.03
Oro pulido	0.03
Plata pulida	0.02
Acero inoxidable pulido	0.17
Pintura negra	0.98
Pintura blanca	0.90
Papel blanco	0.92-0.97
Pavimento de asfalto	0.85-0.93
Ladrillo rojo	0.93-0.96
Piel humana	0.95
Madera	0.82-0.92
Suelo	0.93-0.96
Agua	0.96
Vegetación	0.92-0.96

2.4.4. Conducción de calor en régimen transitorio

Ningún material en la naturaleza tiene una resistencia térmica infinita, muchos problemas de flujo de calor transitorio se pueden resolver con facilidad con una precisión aceptable suponiendo que la resistencia conductiva interna del sistema es tan pequeña que la temperatura dentro del sistema es sustancialmente uniforme en cualquier instante. Esta simplificación se justifica cuando la resistencia térmica interna entre la superficie del sistema y el medio circundante es tan grande comparada con la resistencia térmica interna del sistema que controla el proceso de transferencia de calor [18].

En el análisis de la transferencia de calor, se observa que algunos cuerpos se comportan como si su temperatura interior permanece uniforme en todo momento

durante un proceso de transferencia de calor. La temperatura de esos cuerpos se puede tomar sólo como una función del tiempo. El análisis de la transferencia de calor que utiliza esta idealización se conoce como análisis de sistemas concentrados, el cual proporciona una gran simplificación en ciertas clases de problemas de transferencia de calor sin mucho sacrificio de la exactitud.

Si se considera un cuerpo de forma arbitraria, inicialmente a una temperatura T_i , colocado en un medio a la temperatura T_∞ y se lleva a efecto transferencia de calor entre ese cuerpo y su medio ambiente, suponiendo que $T_\infty > T_i$, aunque el análisis es igualmente válido para el caso opuesto, se supondrá que el análisis de sistemas concentrados es aplicable, de modo que la temperatura permanece uniforme dentro del cuerpo en todo momento y solo cambia con el tiempo. La siguiente ecuación permite determinar la temperatura $T(t)$ en el instante t .

$$\frac{T(t) - T_\infty}{T_i - T_\infty} = e^{-bt} \quad (2.8)$$

Donde:

$T(t)$ es la temperatura del cuerpo en cualquier instante de tiempo

T_∞ es la temperatura del medio

T_i es la temperatura inicial del cuerpo

b es el recíproco de la constante de tiempo

t es el tiempo

El coeficiente b es una cantidad positiva cuya dimensión es $tiempo^{-1}$ cuya expresión es la siguiente.

$$b = \frac{h A_s}{\rho V c_p} \quad (2.9)$$

Donde:

h es un coeficiente de transferencia de calor

A_s es el área superficial

ρ es la densidad

V es el volumen

c_p es el calor específico

La cantidad total de transferencia de calor entre el cuerpo y el medio circundante durante el intervalo desde tiempo de $t = 0$ hasta t es simplemente el cambio en el contenido de energía de ese cuerpo, que se expresa en la siguiente ecuación.

$$Q = m c_p [T(t) - T_i] \quad (2.10)$$

Donde:

m es la masa

c_p es el calor específico

$T(t)$ es la temperatura del cuerpo en cualquier instante de tiempo

T_i es la temperatura inicial del cuerpo

El primer paso en el establecimiento de un criterio para la aplicabilidad del análisis de sistemas concentrados es definir la longitud característica como se muestra a continuación.

$$L_c = \frac{V}{A_s} \quad (2.11)$$

Y un número de Biot, Bi , el cual es la razón de la resistencia interna de un cuerpo a la conducción de calor con respecto a su resistencia externa a la convección de calor. Por lo tanto, un número pequeño de Biot representa poca resistencia a la conducción del calor y, por lo tanto, gradientes pequeños de temperatura dentro del cuerpo. En general se acepta que el análisis de sistemas concentrados es aplicable si $Bi \leq 0.1$. A continuación, se muestra la ecuación que define el número de Biot.

$$Bi = \frac{h L_c}{k} \quad (2.12)$$

También se debe definir otro número adimensional denominado número de Fourier, Fo , o τ que es un tiempo sin dimensión, el cual se muestra en la siguiente ecuación.

$$Fo = \frac{\alpha t}{L^2} = \tau \quad (2.13)$$

Donde:

α es la difusividad térmica del material

L es la longitud característica

T es el tiempo

La difusividad térmica del material α , es una propiedad del material y la velocidad con la que cambia la temperatura depende de su valor numérico. Se define en la siguiente ecuación.

$$\alpha = \frac{k}{\rho c_p} \quad (2.14)$$

La ecuación (2.15) es la versión generalizada de la ecuación (2.8).

$$\frac{T(t) - T_{\infty}}{T_i - T_{\infty}} = e^{-Bi Fo} \quad (2.15)$$

2.5. Transformador

Los transformadores son máquinas eléctricas estáticas, constituidas por dos devanados, inductor e inducido. El devanado inductor se conecta a una fuente de c.a. (corriente alterna) de frecuencia f_1 y se denomina primario. El devanado inducido tiene una frecuencia $f_2 = f_1$ y entrega energía eléctrica a un circuito exterior por medio de conexiones fijas; este arrollamiento inducido recibe el nombre de secundario. Para aumentar la inducción magnética del sistema y mejorar el acoplamiento entre ambos devanados, éstos van arrollados sobre un núcleo cerrado común, constituido por un apilamiento de chapas magnéticas de acero al silicio, tal como se muestra en la Figura 2.8.

Si la tensión entre los terminales del arrollamiento primario, V_1 , es menor que la tensión secundaria, V_2 , es decir, $V_1 < V_2$, el transformador se denomina elevador; en el caso contrario se llama transformador reductor $V_1 > V_2$ [21].

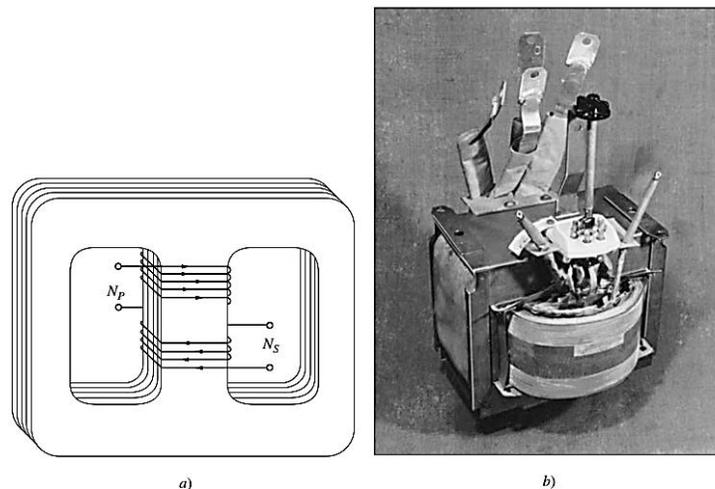


Figura 2.8: a) Construcción de un transformador tipo acorazado. b) Transformador convencional tipo acorazado [22]

2.5.1. El transformador ideal

Un transformador ideal es un dispositivo sin pérdidas que tiene un devanado de entrada y un devanado de salida [22]. La Figura 2.9 muestra un transformador ideal. Las ecuaciones utilizadas para los cálculos de transformadores ideales se muestran a continuación en la ecuación (2.16).

$$\frac{v_P(t)}{v_S(t)} = \frac{N_P}{N_S} \quad (2.16)$$

Donde:

$v_P(t)$ es el voltaje aplicado al lado primario del transformador

$v_S(t)$ es el voltaje producido en el lado secundario

N_P es el número de vueltas de alambre en el lado primario

N_S es el número de vueltas de alambre en el lado secundario

Se puede definir un coeficiente a como la relación de transformación del transformador, como se muestra a continuación.

$$a = \frac{N_P}{N_S} \quad (2.17)$$

La relación entre la corriente que fluye del lado primario del transformador y la corriente que sale del lado secundario del transformador es.

$$\frac{i_P(t)}{i_S(t)} = \frac{1}{a} \quad (2.18)$$

Donde:

$i_p(t)$: corriente que fluye del lado primario del transformador

$i_s(t)$: corriente que sale del lado secundario del transformador

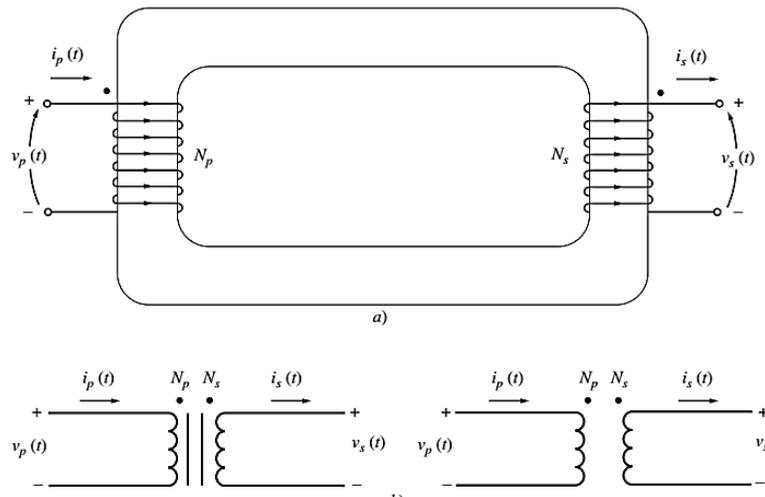


Figura 2.9: a) Dibujo de un transformador ideal. b) Símbolos esquemáticos de un transformador. A veces el núcleo de hierro se muestra en el símbolo y a veces no. [22]

2.6. Placa Arduino

La placa Arduino es una placa de circuito impreso (PCB) diseñada para usar un chip de microcontrolador, así como otras entradas y salidas. La placa cuenta con muchos otros componentes electrónicos necesarios para que el microcontrolador funcione o amplíe sus capacidades.

2.6.1. Funciones generales de Arduino

Todas las placas Arduino tienen algunas capacidades y funciones clave las cuales son las siguientes:

- **Microcontrolador.** Es el cerebro del Arduino, un microcontrolador es una computadora pequeña contenida en un solo circuito integrado o chip de computadora. Los microcontroladores son una excelente manera de programar y controlar electrónica. Las placas de microcontrolador tienen un chip de microcontrolador y otros conectores útiles y componentes que permiten al usuario unir entradas y salidas [23].
- **Programación.** Las interfaces de programación permiten cargar software en el Arduino.
- **E / S:** el circuito de entrada / salida (E / S) es lo que habilita su interfaz Arduino con sensores, actuadores, etc.
- **Energía:** Existe una variedad de formas de suministrar energía a un Arduino. La mayoría de las placas Arduino pueden cambiar automáticamente entre la alimentación de múltiples fuentes (como USB y una batería) [24].

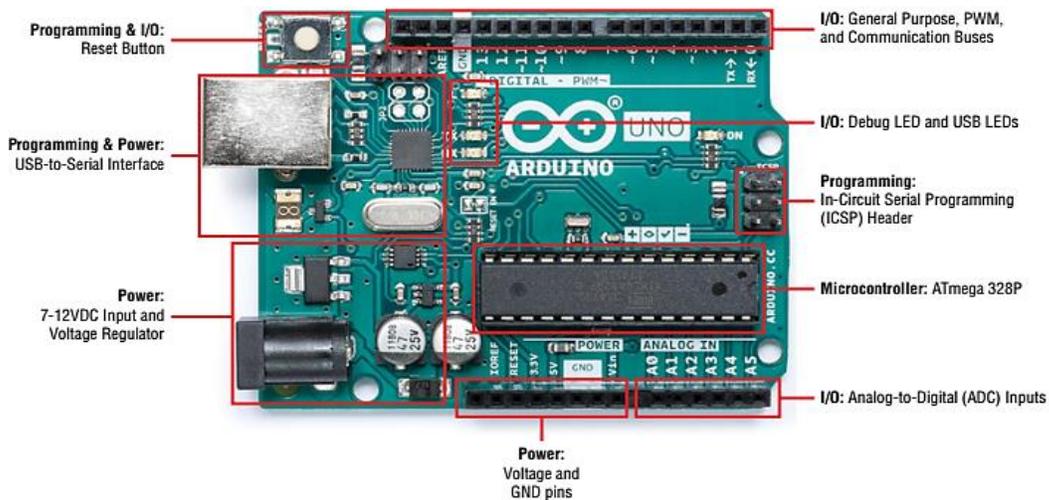


Figura 2.10: Componentes de Arduino uno. [24]

2.6.2. Arduino Uno

La placa Uno es la primera placa Arduino estándar con un procesador ATmega328; cuenta con 14 pines de E/S digitales, de los cuales 6 se pueden usar como salida PWM; y 6 pines de entrada analógica. La placa Uno tiene 32 KB de memoria flash y 2 KB de SRAM. Tiene un conector USB tipo B estándar. La Figura 2.10 muestra los componentes de un Arduino Uno.

2.6.3. Arduino Mega 2560

El Arduino Mega 2560 se basa en el procesador ATmega2560 (de ahí el nombre). La placa admite 54 puertos de E/S digitales masivos, de los cuales 14 se pueden usar como salida PWM; 16 entradas analógicas; y 4 UART (puertos seriales de hardware). Utiliza un reloj de 16MHz y tiene 256KB de memoria flash.

El Mega 2560 es esencialmente una forma más grande del Arduino estándar (Uno) [25]. La Figura 2.11 muestra a la placa Arduino Mega 2560.

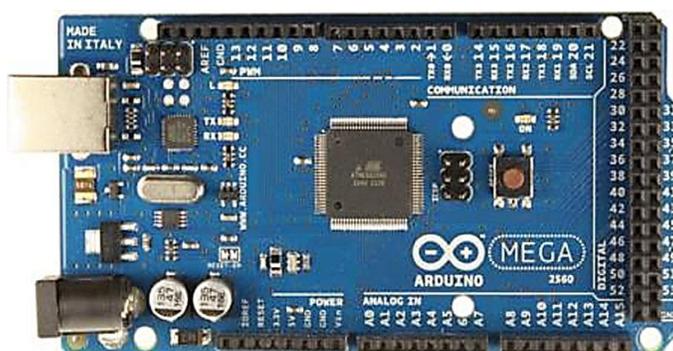


Figura 2.11: Arduino Mega. [25]

2.6.4. Arduino Micro

El Arduino Micro es una placa de microcontrolador basada en el procesador ATmega32U4. Tiene 20 pines de entrada / salida digital (de los cuales 7 se pueden usar como salidas PWM y 12 como entradas analógicas), un oscilador de cristal de 16 MHz, una conexión micro USB, un encabezado ICSP y un botón de reinicio. Contiene todo lo necesario para soportar el microcontrolador; se conecta a una computadora mediante a una un cable micro USB. Tiene un factor de forma que permite colocarlo fácilmente en una placa de pruebas (*protoboard* en inglés) [26]. La Figura 2.12 muestra la forma de un Arduino micro.

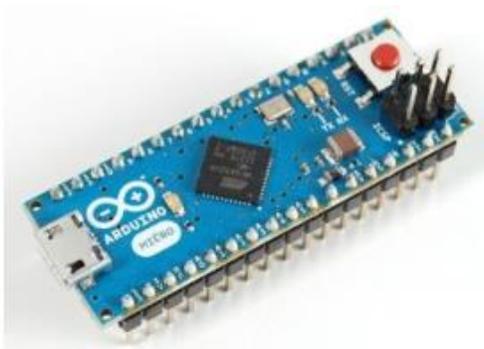


Figura 2.12: Arduino micro. [26]

Capítulo 3. Desarrollo

En este capítulo se muestra el método utilizado para la realización del presente trabajo, el siguiente diagrama contiene los pasos a seguir para la obtención de resultados.

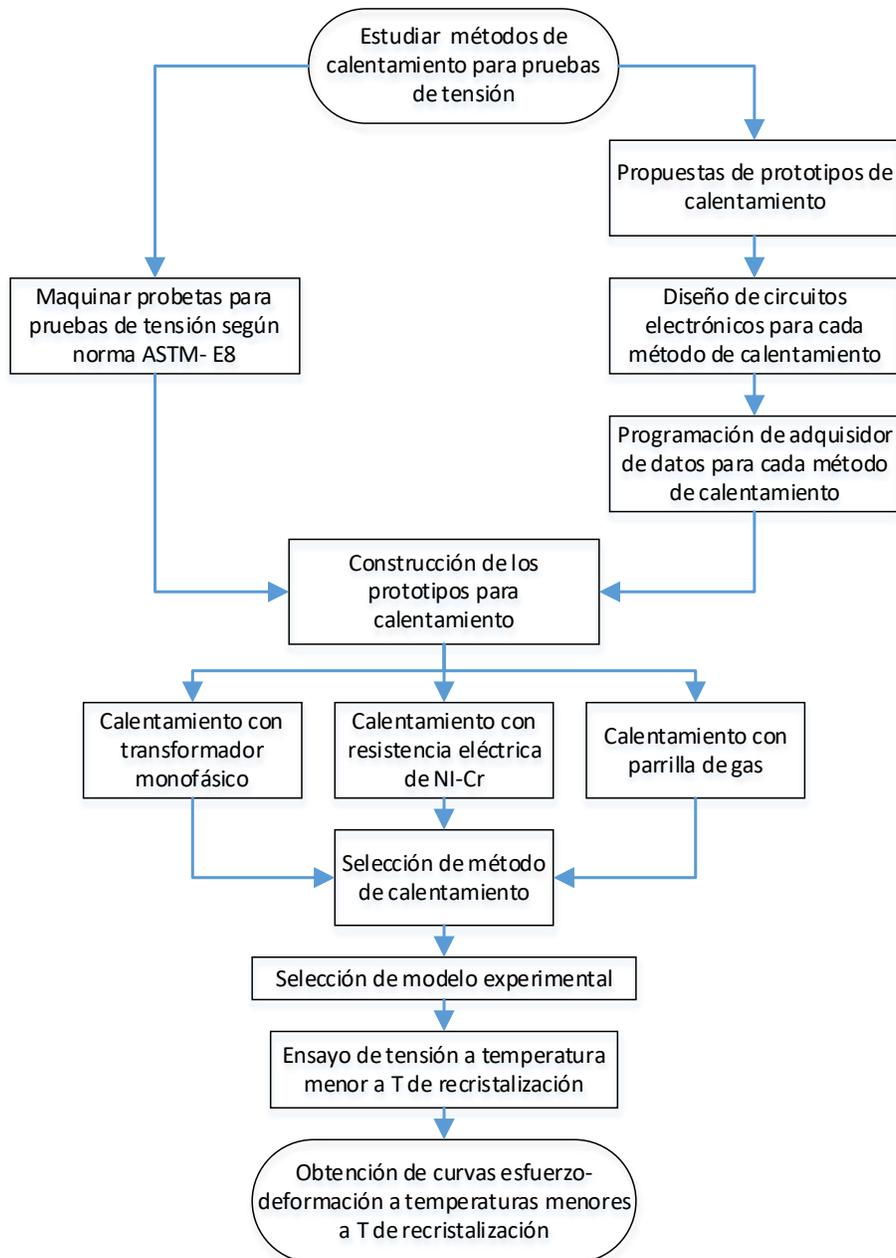


Figura 3.1: Diagrama de flujo de tesis

3.1. Maquinado de probetas

Utilizando la norma “Métodos de prueba estándar para pruebas de tensión de materiales metálicos” o por su nombre en inglés (*Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials*) [27], en el apartado general 6.1 se obtienen las dimensiones mínimas requeridas para la fabricación de las probetas. En la Figura 3.2 se muestran las probetas de aluminio 6061 maquinadas para los ensayos de tensión propuestos en este trabajo.



Figura 3.2: Probetas maquinadas de aluminio 6061

3.2. Propuestas de métodos de calentamiento

Se proponen 3 métodos de calentamiento para las probetas en los ensayos de tensión.

3.2.1. Calentamiento mediante el uso de un transformador eléctrico monofásico

La primera propuesta de diseño que se plantea consiste en colocar un transformador monofásico en corto circuito en su devanado secundario mediante el uso de unas pinzas de caimán las cuales se encuentran conectadas al cable de la bobina secundaria. Al hacer circular corriente alterna en el circuito secundario una vez colocada la probeta en las mordazas de las pinzas se crea un corto circuito, el cual generará un calentamiento en la probeta, hasta obtener la temperatura deseada. La Figura 3.3 muestra la propuesta de diseño de calentamiento mediante el uso de un transformador.

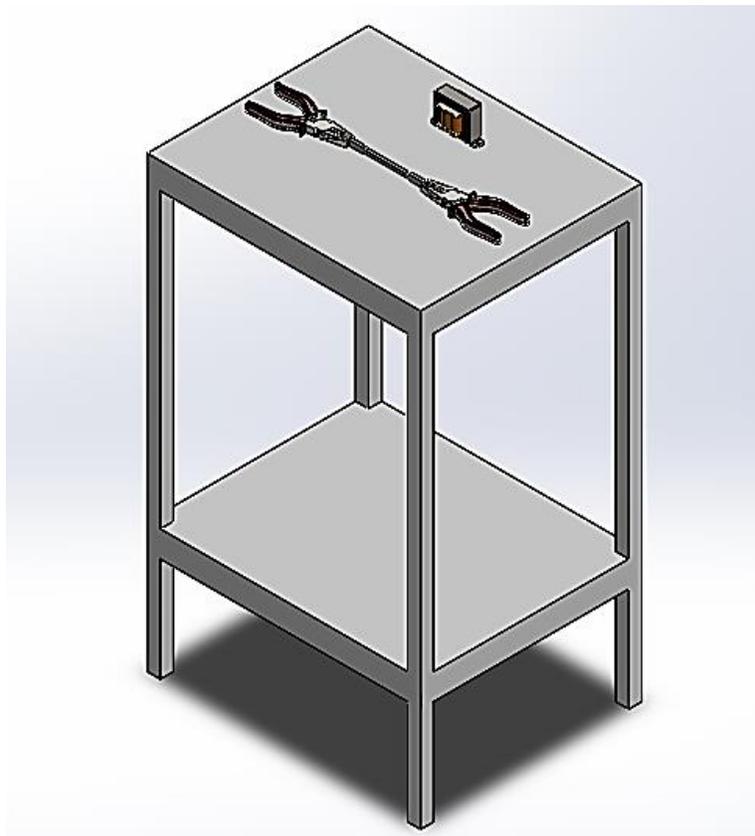


Figura 3.3: Propuesta de diseño de calentamiento mediante el uso de transformador eléctrico monofásico.

Software: Solidworks®. Fuente: Elaboración propia

3.2.2. Calentamiento mediante el uso de una resistencia eléctrica de Nicromo

La segunda propuesta de diseño para calentamiento de la probeta se basa en el principio de calentamiento por radiación, en la cual se colocará una resistencia eléctrica de Nicromo (Ni-Cr) dentro de un material cerámico que se colocará en la parte central de la probeta, a su vez se requiere un soporte o base para mantener fija la parte del cerámico, como se puede apreciar en la Figura 3.4. El mecanismo de funcionamiento es el siguiente, se hace fluir una corriente eléctrica alterna por el circuito la cual calienta la resistencia de Ni-Cr, la transferencia de calor de la resistencia a la probeta se realiza mayoritariamente por el mecanismo de radiación sin contacto directo con la probeta.

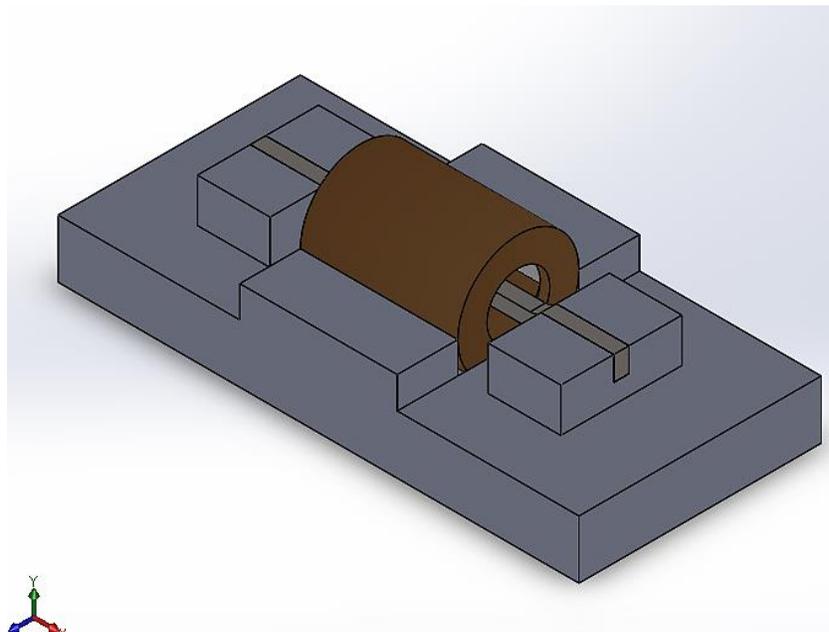


Figura 3.4: Propuesta de diseño de calentamiento por resistencia de Ni-Cr. Software: Solidworks®. Fuente: Elaboración propia

3.2.3. Parrilla de gas licuado a presión

La tercera propuesta de diseño consiste en utilizar una parrilla de gas LP para calentar la probeta cubierta de arena conglomerada que estará situada sobre una plancha de cocción la cuál recibe un flujo de calor de la parte inferior. En la Figura 3.5 se observa la propuesta de diseño de calentamiento de la probeta mediante una parrilla de gas.

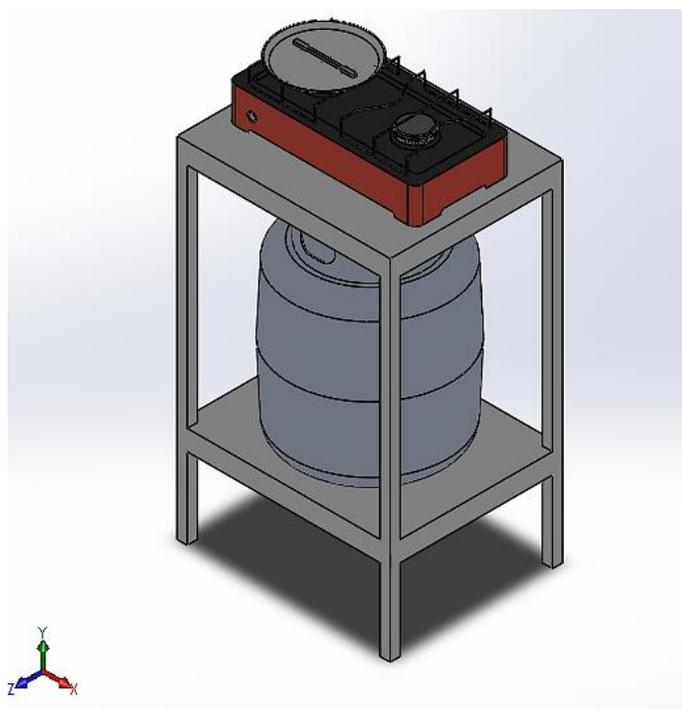


Figura 3.5: Propuesta de diseño de calentamiento mediante el uso de una parrilla de gas LP. Software: Solidworks®. Fuente: Elaboración propia

3.3. Sensores y circuitos electrónicos para mediciones y adquisición de datos

Los sensores utilizados para adquirir datos fueron considerados para ser compatibles con el microcontrolador Arduino en sus versiones uno y mega, debido a su bajo costo y gran número de librerías disponibles, así como de módulos existentes en el mercado.

3.3.1. Circuito electrónico para el prototipo de calentamiento para el transformador eléctrico

Debido a que en este prototipo de calentamiento se trabaja con corriente alterna muy alta que circula en un transformador cuyo devanado secundario se encuentra en corto circuito, se optó por utilizar los siguientes sensores y componentes electrónicos.

- 2 placas Arduino uno. Serán utilizados para el procesamiento de las señales de entradas analógicas y digitales.
- 2 módulos Max 6675, el cual se especializa en convertir las señales analógicas a digitales de los termopares tipo K.
- 2 sensores termopares tipo K. Será el sensor de contacto para medición de temperatura.
- 1 módulo de sensor de temperatura infrarrojo MLX90614, con el cual se tomarán las mediciones de temperatura sin contacto de la probeta y la temperatura ambiente.
- 1 sensor de corriente alterna (AC) no invasivo SCT-013.
- 1 circuito integrado LM358 para acondicionar la señal del sensor de corriente no invasivo.

- 1 módulo de sensor de voltaje para corriente alterna (AC) ZMPT101B.

En la Figura 3.6 se muestra el esquema de los sensores utilizados para la medición de las temperaturas, voltaje AC y corriente en AC.

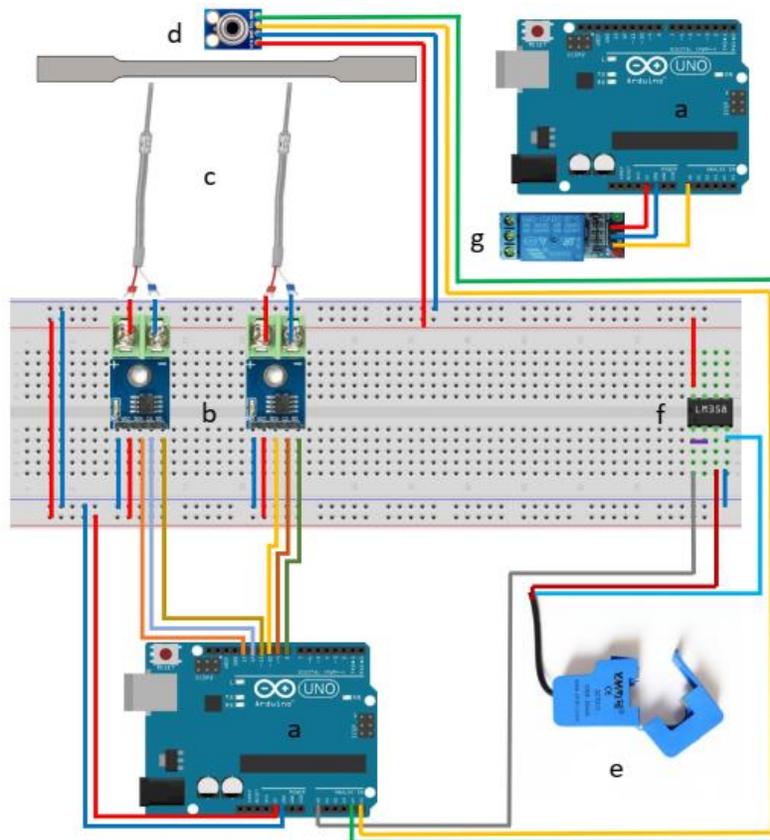


Figura 3.6: Esquema de circuito para la adquisición de datos del prototipo 1, donde: a) Arduino uno, b) módulo Max 6675, c) termopar tipo K, d) módulo MLX90614, e) sensor SCT-013, f) circuito integrado LM358, g) módulo ZMPT101B. Software: Fritzing ®. Fuente: Elaboración propia

3.3.2. Circuito electrónico para el prototipo de calentamiento por resistencia eléctrica de Nicromo

El circuito utilizado para calentar la probeta y adquirir datos para el prototipo número 2 es el que se muestra en la Figura 3.7 , los componentes utilizados para este circuito son los siguientes.

- 1 Arduino mega. Utilizado para recibir las señales de voltaje y corriente de los sensores y procesar los datos adquiridos.
- 3 módulos Max 6675, el cual se especializa en convertir las señales analógicas a digitales de los termopares tipo K.
- 3 sensores termopares tipo K. Se utilizarán dos para medir la temperatura en la superficie de la probeta, uno en la parte central y el otro en un extremo expuesto al ambiente, y el tercer termopar para medir la temperatura de la resistencia eléctrica.
- 1 módulo relevador. Con el cual se abrirá para dejar pasar corriente y cuando alcance la temperatura superior a 10 °C por encima de la temperatura de prueba se cerrará impidiendo que fluya corriente eléctrica, y volverá a activarse cuando la temperatura se encuentre por debajo de la temperatura deseada, además de servir como protección para corrientes mayores a 10 Amperios.
- 1 regulador de voltaje (dimmer en inglés) de AC. Este regulador permitirá ajustar el voltaje del circuito de la probeta con lo cual se controla la corriente que fluye y por ende la temperatura de la probeta.
- 1 módulo de corriente ACS712. Este módulo permite medir corriente eléctrica alterna, es invasivo por lo cual se conecta en serie en el circuito para medir la variación de corriente que consume la probeta.
- 1 módulo de sensor de voltaje para corriente alterna ZMPT101B.

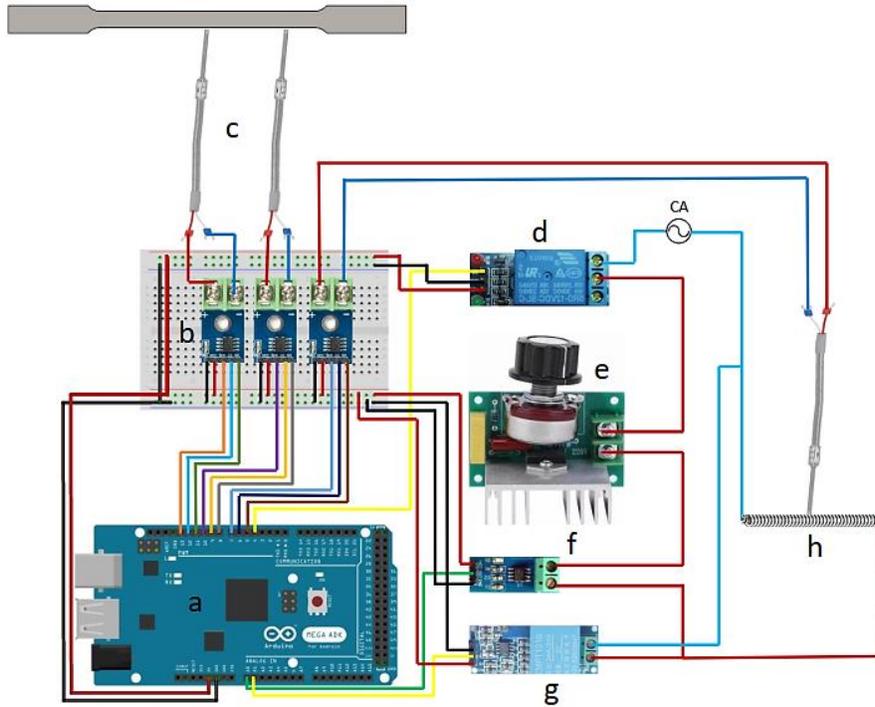


Figura 3.7: Esquema de circuito para la adquisición de datos del prototipo 2, donde: a) Arduino mega, b) módulo Max 6675, c) termopar tipo K, d) módulo relevador, e) regulador de voltaje, f) módulo ACS712, g) módulo ZMPT101B, h) resistencia de Ni-Cr. Software: Fritzing ©. Fuente: Elaboración propia

3.3.3. Circuito electrónico para el prototipo de calentamiento mediante parrilla de gas licuado a presión (L.P.)

Para las mediciones del prototipo de calentamiento mediante parrilla eléctrica, los componentes utilizados son los que se muestran en la Figura 3.8, a continuación, se dará una descripción de cada uno de ellos:

- 1 Arduino mega. Utilizado para recibir las señales de voltaje y corriente de los sensores y procesar los datos adquiridos.
- 5 módulos Max 6675, el cual se especializa en convertir las señales analógicas a digitales de los termopares tipo K.
- 5 sensores termopares tipo K.

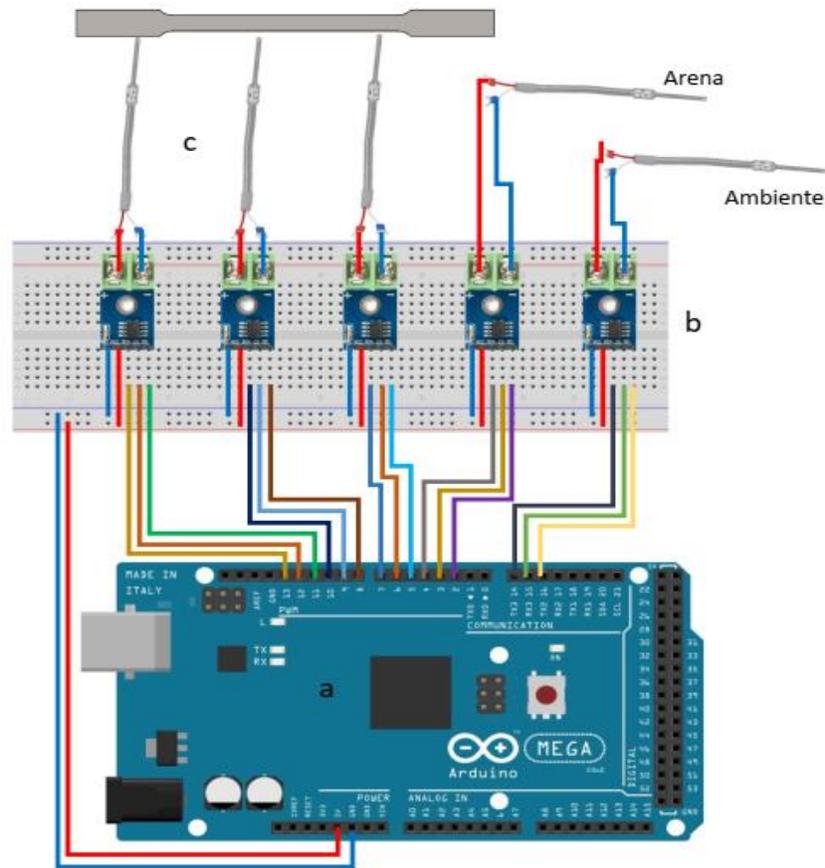


Figura 3.8: Esquema de circuito para la adquisición de datos del prototipo 3, donde: a) Arduino mega, b) módulo Max 6675, c) termopar tipo K. Software: Fritzing ®. Fuente: Elaboración propia

El siguiente paso consiste en realizar la programación en entorno de desarrollo Arduino para cada uno de los tres circuitos para la adquisición de datos de los sensores.

3.4. Construcción de los prototipos

El apartado expuesto a continuación muestra los materiales para la construcción de los tres prototipos propuestos, así como los pasos a seguir para el ensamble y la instrumentación del prototipo.

3.4.1. Prototipo de calentamiento para el transformador eléctrico

Los materiales utilizados para la construcción son los siguientes.

- 2 caimanes grandes tipo acumulador.
- 1 transformador monofásico.
- 1 cable eléctrico calibre 10 AWG.
- 1 botonera de 3 pulsadores arranque-paro.

Los pasos a seguir para montar el prototipo son los siguientes.

- Eliminar el devanado secundario del transformador.
- Colocar cable alrededor de núcleo ferromagnético, el cual será el nuevo devanado secundario.
- Unir los extremos de los cables de la bobina secundaria con uno de los mangos de cada caimán cada uno mediante una unión mecánica utilizando una prensa para comprimir.
- Colocar termopares en la probeta, fijados con alambre.
- Cubrir la probeta con cinta de fibra de vidrio para reducir las pérdidas por convección debido a la exposición a la temperatura ambiente.
- Montar la probeta en los extremos de la boca dentada de los caimanes.
- Colocar cables en las terminales del devanado primario, para alimentar el transformador.
- Montar sensores en el prototipo, y enlazar los sensores al Arduino.

- Verificar conexiones del circuito eléctrico.

En la Figura 3.9 se muestra el prototipo armado con los sensores colocados.

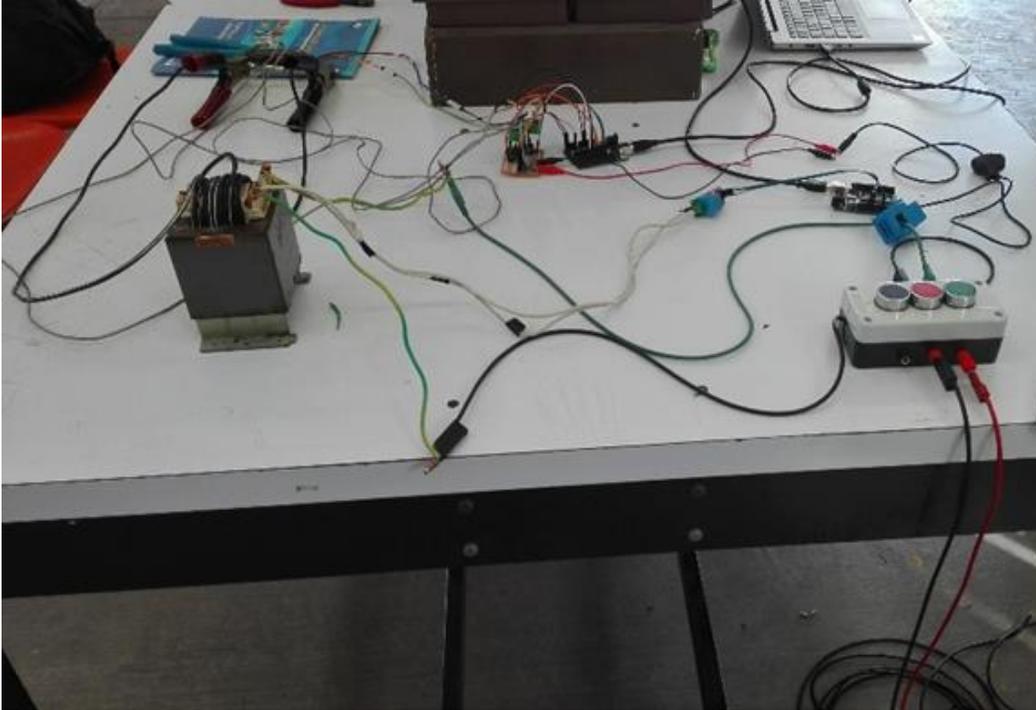


Figura 3.9: Prototipo de calentamiento mediante transformador.

3.4.2. Prototipo de calentamiento por resistencia eléctrica de Nicromo

Para la construcción del siguiente prototipo se utilizaron los siguientes materiales

- 1 base de acero.
- 1 cerámico refractario.
- 1 resistencia de Nicromo.
- 1 cinta de fibra de vidrio.

A continuación, se muestran los pasos para el ensamble del prototipo de calentamiento por resistencia eléctrica.

- Colocar resistencia de Ni-Cr dentro del material refractario, asegurándose de que la resistencia quede sujeta.
- Envolver refractario con la cinta de fibra de vidrio para reducir pérdidas de calor.
- Fijar termopares en contacto con la probeta y en contacto con la resistencia eléctrica.
- Ensamblar la base del prototipo
- Colocar el refractario en la base
- Montar la probeta dentro del refractario y fijar los extremos de la probeta en la base.
- Armar el circuito eléctrico-electrónico junto con los sensores
- Asegurar que el circuito esté montado adecuadamente.

La Figura 3.10 muestra el banco de pruebas del prototipo armado, con los sensores de temperatura, de corriente y voltaje, conectados al Arduino Mega.

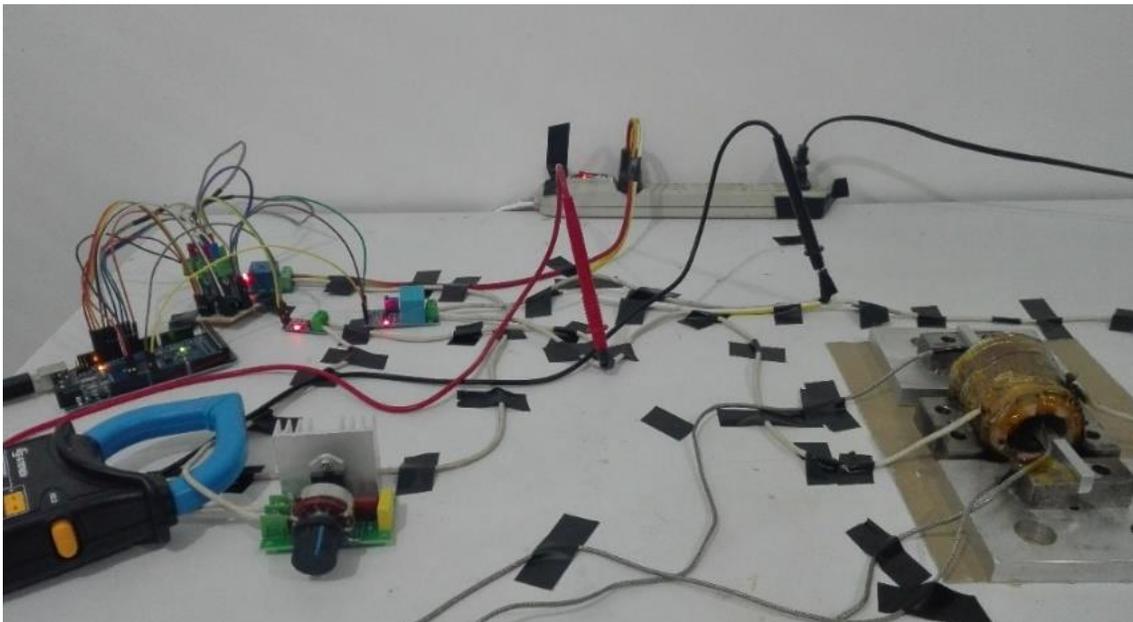


Figura 3.10: Prototipo de pruebas de calentamiento mediante resistencia eléctrica

3.4.3. Prototipo de calentamiento mediante parrilla de gas L.P.

Los materiales e instrumentos para el tercer prototipo de calentamiento son los enunciados a continuación.

- 1 tanque de gas licuado a presión (L.P.).
- 1 plancha de acero para cocción.
- 1 estufa de gas de dos quemadores.
- Arena aglomerante.

Los pasos a seguir para colocar el equipo para el método experimental de calentamiento mediante el uso de una parrilla de gas se muestran a continuación.

- Colocar sobre una mesa el tanque de gas y la parrilla.
- Realizar la conexión de la manguera del tanque con la parrilla
- Colocar termopar sobre la placa de calentamiento fijado mediante alambre recocado a una distancia de 1 cm de la superficie de la placa.
- Colocar sensor termopar en la probeta.
- Verter arena sobre la placa para cocción hasta que cubra el sensor de termopar a una distancia de 1.8 cm, después colocar probeta y cubrir uniformemente con el resto de la arena.
- Realizar las conexiones del circuito electrónico para la adquisición de datos.

La siguiente imagen muestra el prototipo armado y funcional.



Figura 3.11: Prototipo de calentamiento mediante parrilla de gas en durante el experimento

3.5. Metodología para los ensayos de calentamiento

En el apartado expuesto a continuación se explica el procedimiento para realizar las pruebas de calentamiento de los tres métodos experimentales propuestos, así como el número de casos para poder realizar el diseño de experimentos.

3.5.1. Método experimental para el calentamiento utilizando un transformador monofásico

Para realizar el experimento, la variable a utilizar es el tiempo en que se deja pasar la corriente al transformador, debido a la alta corriente en la bobina secundaria, la única prueba viable realizada para este método consistió en lo siguiente: la temperatura inicial de la probeta es la temperatura ambiente, se hace circular la

corriente de corto circuito por corto periodo de tiempo, con lo cual se eleva la temperatura de la probeta debido a la corriente. La Figura 3.12 muestra un plano con la ubicación de los sensores de temperatura, y la Figura 3.13 muestra la probeta montada con los sensores en sus ubicaciones correspondientes.

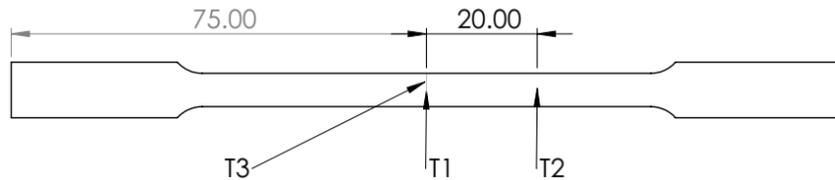


Figura 3.12: Ubicación de sensores en la probeta para pruebas de calentamiento, unidades (mm). Fuente: Elaboración propia.



Figura 3.13. Probeta sujeta por los caimanes, donde se aprecian los termopares y el sensor de temperatura infrarrojo

Los datos a adquirir son los siguientes:

- Tiempo de prueba.
- Corriente RMS.
- Voltaje RMS.
- T. central (T1).

- T. exterior de probeta en aislamiento de fibra de vidrio (T2).
- T. medida con sensor infrarrojo (T3).

3.5.2. Calentamiento utilizando resistencia eléctrica de Nicromo

Para realizar los experimentos para el prototipo de calentamiento mediante una resistencia eléctrica, la metodología es la siguiente.

- Colocar probeta dentro de cerámico, con los termopares.
- Ajustar variador de voltaje, a la diferencia de potencial requerida para cada prueba.
- Abrir aplicación de Arduino para cargar el código en la placa Arduino y poder adquirir datos.
- Presionar interruptor para iniciar prueba, la temperatura máxima, se tomará como la temperatura requerida más 9 °C, debido a que una vez alcanzada esa temperatura, el relevador se activará para no dejar fluir corriente, por tal causa la temperatura descenderá en ese punto, se tomará como temperatura de reactivación del circuito una temperatura un grado menor que la temperatura máxima, para que el circuito se cierre, fluya corriente y la temperatura de la probeta no sea menor a la Temperatura requerida, de esta forma se puede controlar la temperatura y puede oscilar en un rango de Temperatura requerida y Temperatura máxima.
- Debido a que el tiempo necesario según las pruebas de tensión realizadas en la máquina universal tienen un tiempo promedio no mayor a 3 minutos, se ha optado al momento de alcanzar la temperatura requerida que se tomen 5 minutos más la temperatura oscilando en T. máxima y T. requerida.

- Después de los 5 minutos en que la probeta se mantuvo a una temperatura de oscilación mayor a T_r requerida y menor a T_m máxima, se concluye la prueba.
- Para realizar la siguiente prueba se debe disminuir la temperatura de la probeta y la temperatura de la resistencia a hasta alcanzar la temperatura ambiente.

La Figura 3.14 muestra un dibujo con la ubicación de los sensores de temperatura.

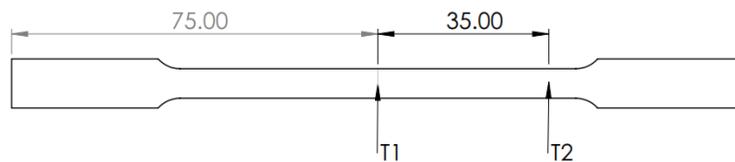


Figura 3.14. Ubicación de termopares, unidades (mm). Fuente: Elaboración propia.

La Figura 3.15 muestra la probeta montada con los sensores en los lugares correspondientes según la imagen anterior.



Figura 3.15. Probeta montada dentro del cerámico, donde se pueden apreciar los cables de los termopares utilizados

La Tabla 3.1 muestra la matriz de experimentos utilizada para las pruebas de calentamiento mediante el uso de resistencia de Ni-Cr.

Tabla 3.1. Matriz de experimentos de casos para prototipo 2

Variables	Valores	$T_{0_probeta}$	T_{0_resist}
$T_{f_probeta}$	100 °C	T_{amb}	T_{amb}
	150 °C	T_{amb}	T_{amb}
	200 °C	T_{amb}	T_{amb}
	250 °C	T_{amb}	T_{amb}
	300 °C	T_{amb}	T_{amb}
	350 °C	T_{amb}	T_{amb}

Los datos a adquirir son los siguientes.

- T. central de la probeta (T1).
- T. extremo de la probeta (T2).
- T. resistencia (T3).
- Voltaje RMS.
- I RMS.

3.5.3. Calentamiento mediante parrilla de gas

El procedimiento para realizar los experimentos de calentamiento mediante parrilla de gas es el siguiente:

Pasos para calentamiento de probeta cuando la temperatura inicial de la arena es igual a T. ambiente.

- Colocar el sensor de temperatura a 1 cm de la superficie de la plancha para calentamiento, se cubre con arena hasta alcanzar desde una distancia desde la base de la plancha a la parte superior de la arena de 1.8 cm.
- Colocar probeta sobre la arena y cubrir con el resto de arena toda la probeta uniformemente.
- Abrir programa de Arduino para adquirir datos.
- Abrir perilla de la estufa de gas a la potencia requerida, de esta manera se controlará la potencia de la flama.
- Una vez alcanzado el estado estable del sistema, sacar la probeta de la arena y dejar enfriar a T. ambiente, la flama deberá seguir encendida, para que la arena no baje su temperatura y se pueda realizar la prueba siguiente
- Cuando la Temperatura de los sensores sea igual a la temperatura ambiente terminar prueba.

Pasos para calentamiento de probeta cuando la temperatura inicial de la arena es igual a T. de equilibrio.

- Colocar la probeta que se encuentra a temperatura ambiente, sobre la plancha de calentamiento arriba de la arena y cubrirla con la arena restante, que se encuentra a temperatura de equilibrio.
- Cuando la temperatura de la probeta alcance la temperatura de equilibrio, retirar probeta de la arena y dejar enfriar a temperatura ambiente.
- Cuando la temperatura de la probeta alcanza a T. ambiente, cerrar la perilla de la estufa, esperar a que la temperatura de la arena alcance la temperatura de equilibrio para volver a realizar la siguiente prueba.

Los datos a adquirir son los siguientes.

- T. extremo 1 de la probeta (T1).

- T. central de la probeta (T2).
- T. extremo 2 de la probeta (T3).
- T arena.
- T. ambiente.

La Figura 3.16 muestra un plano con la ubicación de los sensores de temperatura.

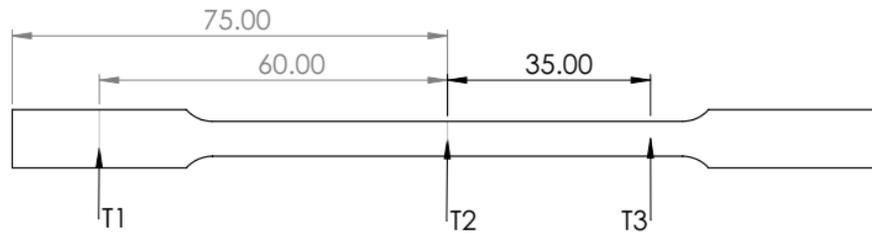


Figura 3.16. Ubicación de termopares en la probeta, unidades (mm)

La Figura 3.17 muestra la probeta montada con los sensores en sus ubicaciones correspondientes.



Figura 3.17. Probeta con los tres termopares sobre su superficie

En la siguiente tabla se muestra la matriz de experimentos a realizar para el método de calentamiento con parrilla de gas.

Tabla 3.2. Matriz de experimentos de casos para prototipo de calentamiento 3

Variables	masa arena	Apertura de gas	Tprobeta (°C)	Tarena
m	0.5 kg	25%	T_{amb}	T_{amb}
				T_{equi}
		50%	T_{amb}	T_{amb}
				T_{equi}
		75%	T_{amb}	T_{amb}
				T_{equi}
	1 kg	25%	T_{amb}	T_{amb}
				T_{equi}
		50%	T_{amb}	T_{amb}
				T_{equi}
		75%	T_{amb}	T_{amb}
				T_{equi}
1.25 kg	25%	T_{amb}	T_{amb}	
			T_{equi}	
	50%	T_{amb}	T_{amb}	
			T_{equi}	
	75%	T_{amb}	T_{amb}	
			T_{equi}	

Capítulo 4. Resultados

En el presente apartado se muestran los resultados obtenidos de los tres diferentes métodos experimentales de calentamiento propuestos, así como también los resultados obtenidos en las pruebas de tensión en caliente.

4.1. Resultados de calentamiento mediante un transformador monofásico

En la *Tabla 4.1* se puede observar la energía que se ocupó para calentar la probeta utilizando un transformador en corto circuito con la probeta, la cual es en promedio 1883.62 W, obsérvese que el tiempo de prueba es de 17 segundos, como la probeta tiene un espesor mayor al diámetro del calibre del alambre del devanado secundario, se producía un corto circuito en el bobinado, debido a lo anterior el alambre se quemaba y resultaba peligroso continuar con la prueba, por lo cual se detenía en ese instante, además de que cada que se realizaba una prueba se debía cambiar el alambre del devanado secundario.

Tabla 4.1. Resultados de calentamiento utilizando un transformador

Tiempo (s)	$T_{\text{prob max}}$ (°C)	$T_{\text{ais max}}$ (°C)	$T_{\text{infr max}}$ (°C)	$T_{\infty \text{ prom}}$ (°C)	$I_{\text{rms prom}}$ (A)	$V_{\text{rms prom}}$ (V)	P_{prom} (W)
17	104.0	93.0	32.19	19.51	14.87	126.67	1883.62

En la imagen siguiente se muestra la curva de calentamiento obtenida con el primer método de calentamiento propuesto, donde T_{cp} es la temperatura de la probeta medida con el termopar, T_{ca} es la temperatura del aislante medida con el termopar, T_{ia} es la temperatura de la probeta medida con el sensor infrarrojo y T_{inf} es la temperatura ambiente, obsérvese que en el instante de tiempo en que se hace

circular la corriente en el transformador se generan picos de calentamiento como resultado de la alta corriente eléctrica que circula los cuales se consideran como ruidos en las mediciones.

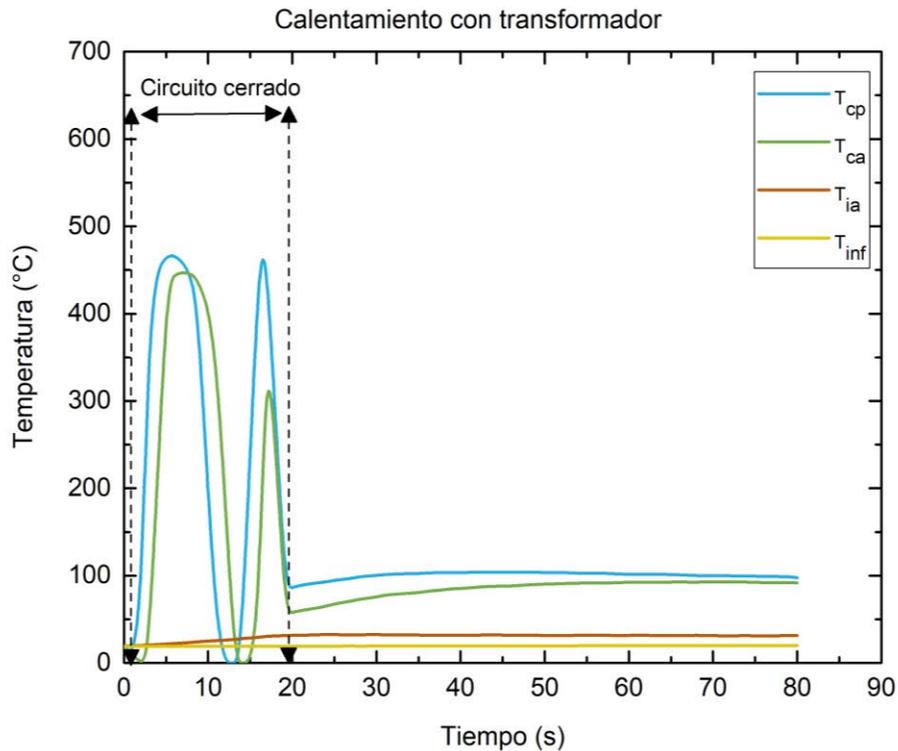


Figura 4.1. Calentamiento con transformador

4.2. Resultados de calentamiento mediante resistencia eléctrica de Ni-Cr

En la Tabla 4.2 se observan los datos obtenidos del calentamiento de la probeta de aluminio mediante el uso de una resistencia de Ni-Cr, donde T_{eqpc} es la temperatura de equilibrio de la probeta en el centro, T_{eqpe} , es la temperatura de la probeta en el exterior que no está cubierta por el cerámico y T_{eqres} es la temperatura de la resistencia, como se puede comparar la temperatura de equilibrio central de la probeta no es la misma que tiene la en los extremos expuestos a la temperatura ambiente, por lo tanto el calentamiento no se realiza de forma uniforme en toda la probeta por ejemplo en la prueba 1 se observa que la temperatura de la

columna 2 es de 100 °C y la temperatura de la columna 3 es de 58.25 °C las cuales corresponden a las temperaturas de la probeta. También se muestra que la Potencia mínima necesaria para calentar la probeta va incrementando en función de la temperatura de equilibrio requerida, hasta alcanzar una potencia máxima de 109.28 Watts a 400 °C en el centro de la probeta.

Tabla 4.2. Resultados obtenidos de calentamiento mediante prototipo 2

Prueba	Teqpc (°C)	Teqpe (°C)	Teqres (°C)	Tiempo cal (min)	Irms (A)	Vrms (V)	P (W)
1	100.0	58.25	243.75	7.20	0.88	17.80	15.65
2	150.0	79.75	313.75	7.32	1.19	24.89	29.71
3	200.0	103.75	399.50	8.58	1.44	31.10	44.87
4	250.0	131.25	467.25	10.62	1.60	34.81	55.73
5	300.0	161.25	527.75	12.28	1.94	38.48	74.80
6	350.0	194.50	574.00	17.97	2.08	43.55	90.66
7	400.0	223.25	636.25	18.15	2.27	48.23	109.28

La siguiente imagen muestra una comparación de las curvas de calentamiento hasta que alcanzan las temperaturas de equilibrio requeridas, también se aprecian como los tiempos de calentamiento van incrementado conforme se requiere una mayor temperatura obteniéndose el mayor tiempo para alcanzar la temperatura de 400 °C el cual corresponde a 18.15 min.

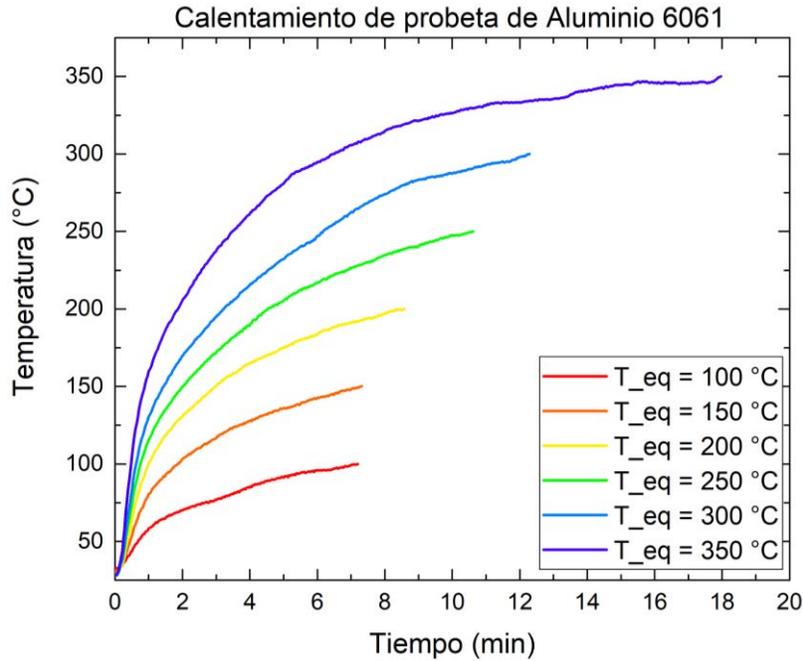


Figura 4.2. Curvas de calentamiento a diferentes temperaturas desde 100 °C a 400 °C

4.3. Resultados de calentamiento mediante parrilla de gas L.P.

En la Tabla 4.3 Se muestran las propiedades físicas y termodinámicas de la probeta utilizada de aluminio 6061.

Tabla 4.3. Tabla de propiedades físicas de la probeta

A_s (m ²)	k (W/m K)	m (kg)	V (m ³)	ρ (kg/m ³)	L_c (m)	C_p (J/kg K)	α (W/m ² J)
0.004236	170	0.01865	6.91 E-06	2.70 E3	1.73E-03	915	6.88E-05

La Tabla 4.4 recopila los datos obtenidos del método 3 para el calentamiento de la probeta, en la cual se resaltan los coeficientes convectivos y los números de Biot

obtenidos. Se puede apreciar que se obtuvieron números de Biot de la magnitud de orden E-02 lo que indica que la temperatura en el interior de la probeta y la temperatura superficial tienen muy poca variación y se puede considerar como que la probeta tiene una temperatura uniforme. La Tabla 4.5 compila los datos obtenidos de los enfriamientos de la probeta a temperatura ambiente de los calentamientos a diferentes temperaturas se puede apreciar por el número de Biot que la temperatura de la probeta se mantiene uniforme en el centro y el exterior.

Las siguientes gráficas muestran las curvas de calentamiento para diferentes masas de arena que cubren a la probeta para el calentamiento, se puede observar que al aumentar la potencia de la flama la temperatura también sube. También se aprecia que al colocar mayor cantidad de arena alrededor de la probeta en el calentamiento, tiene menor pérdida de calor lo cual ayuda a que la temperatura sea mayor comparada con la misma potencia de llama a menor cantidad de masa.

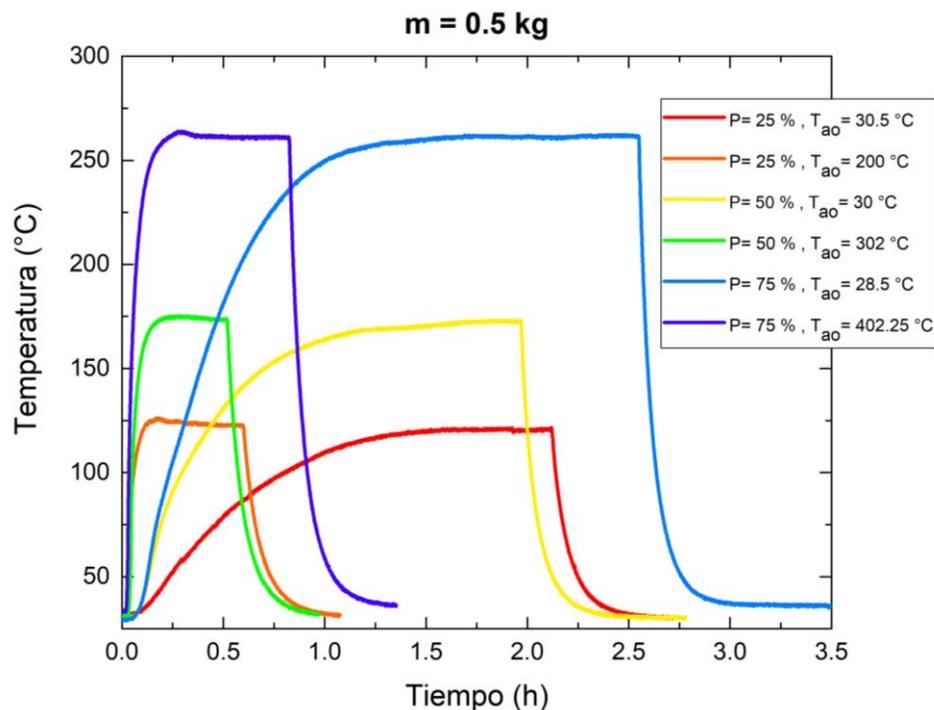


Figura 4.3. Curvas de calentamiento con una masa de arena de 0.5 kg

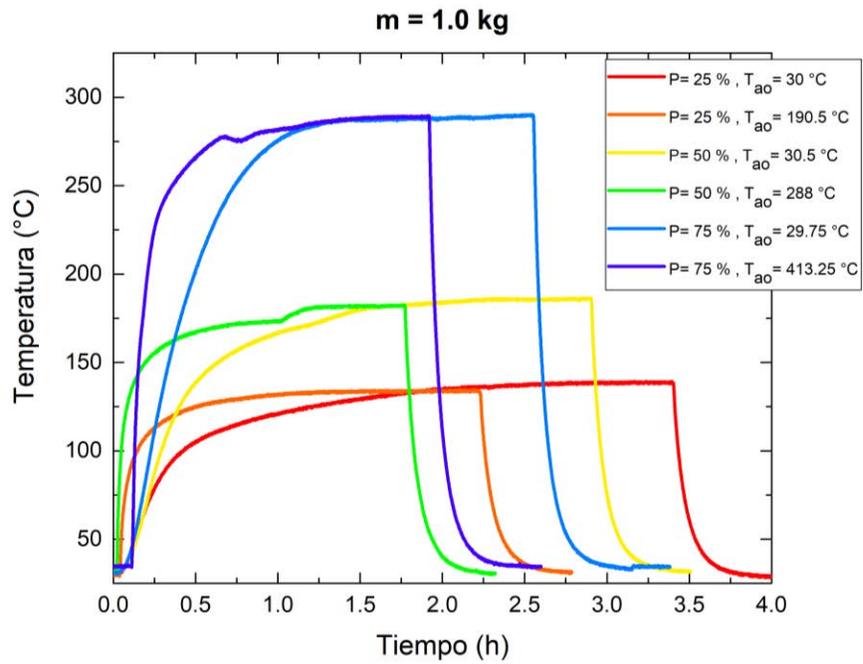


Figura 4.4. Curvas de calentamiento con una masa de arena de 1.0 kg

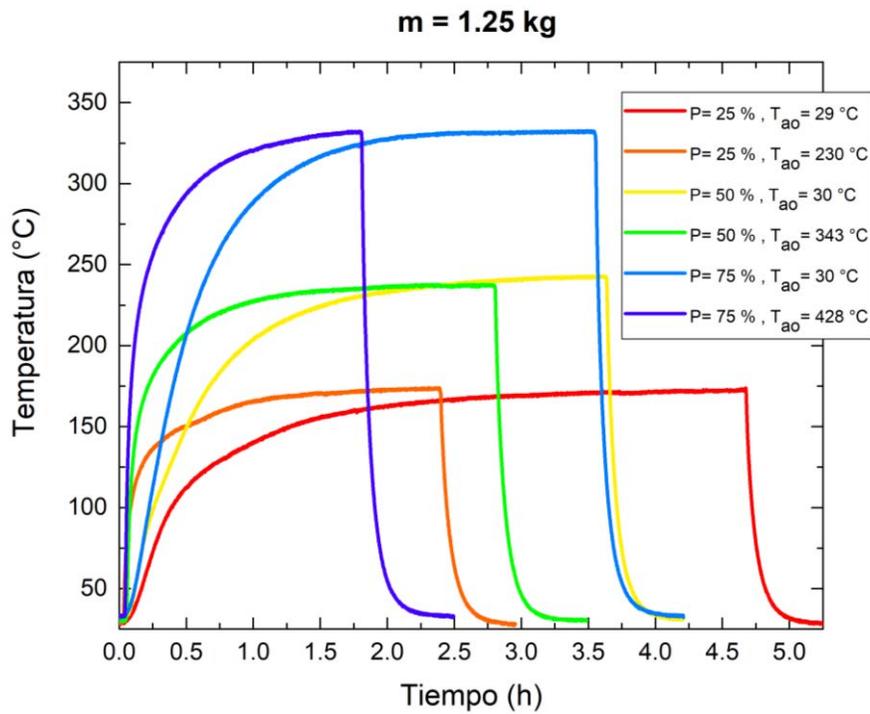


Figura 4.5. Curvas de calentamiento con una masa de arena de 1.25

Tabla 4.4. Datos obtenidos de calentamiento mediante parrilla de gas

No	m_a (kg)	Pot_gas (%)	P_atm (hPa)	hr (%)	Tinf (°C)	Ti (°C)	b (s ⁻¹)	Tiempo_tot (h)	h (W/m ² ·°C)	Bi	Fo	Q (kJ)
1	0.50	25	1004	12	123.93	31.5	2.325	1.904	2.32E+00	2.32E+00	1.90E+00	2.31E-02
2	0.50	25	1017	59	125.43	29.75	33.124	0.2768	3.31E+01	3.31E+01	2.77E-01	2.39E-02
3	0.50	50	1003	7	173.58	30	2.827	1.773	2.83E+00	2.83E+00	1.77E+00	3.59E-02
4	0.50	50	1015	76	173.08	31.25	35.920	0.237	3.59E+01	3.59E+01	2.37E-01	3.55E-02
5	0.50	75	1010	82	263.51	32.75	3.145	1.61	3.14E+00	3.14E+00	1.61E+00	5.77E-02
6	0.50	75	1007	20	261.52	29.5	26.015	0.356	2.60E+01	2.60E+01	3.56E-01	5.80E-02
7	1.00	25	1011	68	141.64	30.5	1.073	2.568	1.07E+00	1.07E+00	2.57E+00	2.78E-02
8	1.00	25	1012	78	130.86	29.25	4.520	0.769	4.52E+00	4.52E+00	7.69E-01	2.54E-02
9	1.00	50	1003	22	188.28	31.25	1.622	2.252	1.62E+00	1.62E+00	2.25E+00	3.93E-02
10	1.00	50	1002	23	171.83	31.5	6.246	0.754	6.25E+00	6.25E+00	7.54E-01	3.51E-02
11	1.00	75	1009	19	291.44	30.5	3.081	1.537	3.08E+00	3.08E+00	1.54E+00	6.52E-02
12	1.00	75	1003	12	285.80	34.75	3.933	1.137	3.93E+00	3.93E+00	1.14E+00	6.28E-02
13	1.25	25	1018	78	171.46	29	1.327	3.868	1.33E+00	1.33E+00	3.87E+00	3.56E-02
14	1.25	25	1010	77	173.99	29	1.901	1.888	1.90E+00	1.90E+00	1.89E+00	3.62E-02
15	1.25	50	1006	63	240.33	31.25	1.837	3.072	1.84E+00	1.84E+00	3.07E+00	5.23E-02
16	1.25	50	1008	77	236.38	30.5	2.449	1.853	2.45E+00	2.45E+00	1.85E+00	5.15E-02
17	1.25	75	1005	78	333.56	32.25	2.053	2.506	2.05E+00	2.05E+00	2.51E+00	7.53E-02
18	1.25	75	1007	75	331.46	33.25	2.679	0.521	2.68E+00	2.68E+00	5.21E-01	7.46E-02

Tabla 4.5. Datos obtenidos de enfriamiento a temperatura ambiente para el método 3

No	m_a (kg)	Pot_gas (%)	P_atm (hPa)	hr (%)	Tinf (°C)	Ti (°C)	b (s ⁻¹)	Tiempo_tot (h)	h (W/m ² -°C)	Bi	Fo	Q (kJ)
1	0.50	25	1004	12	31.17	123.93463	11.970	0.35	1.20E+01	1.20E+01	3.50E-01	-2.32E-02
2	0.50	25	1017	59	32.06	125.42576	11.945	0.357	1.19E+01	1.19E+01	3.57E-01	-2.33E-02
3	0.50	50	1003	7	31.42	173.58352	13.108	0.46	1.31E+01	1.31E+01	4.60E-01	-3.55E-02
4	0.50	50	1015	76	33.00	173.08436	12.977	0.382	1.30E+01	1.30E+01	3.82E-01	-3.50E-02
5	0.50	75	1007	20	37.81	261.51605	13.957	0.451	1.40E+01	1.40E+01	4.51E-01	-5.59E-02
6	0.50	75	1010	82	36.97	263.51415	13.841	0.394	1.38E+01	1.38E+01	3.94E-01	-5.66E-02
7	1.00	25	1011	68	29.78	141.64414	12.432	0.436	1.24E+01	1.24E+01	4.36E-01	-2.80E-02
8	1.00	25	1012	78	32.09	130.85611	12.475	0.462	1.25E+01	1.25E+01	4.62E-01	-2.47E-02
9	1.00	50	1003	22	33.01	188.27617	12.862	0.472	1.29E+01	1.29E+01	4.72E-01	-3.88E-02
10	1.00	50	1002	23	31.74	171.82833	13.016	0.445	1.30E+01	1.30E+01	4.45E-01	-3.50E-02
11	1.00	75	1009	19	35.44	291.43935	14.146	0.455	1.41E+01	1.41E+01	4.55E-01	-6.40E-02
12	1.00	75	1003	12	35.89	285.79518	14.207	0.398	1.42E+01	1.42E+01	3.98E-01	-6.25E-02
13	1.25	25	1018	78	29.81	171.45849	13.490	0.476	1.35E+01	1.35E+01	4.76E-01	-3.54E-02
14	1.25	25	1010	77	29.28	173.9929	13.371	0.399	1.34E+01	1.34E+01	3.99E-01	-3.62E-02
15	1.25	50	1006	63	32.60	240.32626	14.037	0.412	1.40E+01	1.40E+01	4.12E-01	-5.19E-02
16	1.25	50	1008	77	31.56	236.37502	13.988	0.422	1.40E+01	1.40E+01	4.22E-01	-5.12E-02
17	1.25	75	1005	78	35.23	333.5576	14.852	0.461	1.49E+01	1.49E+01	4.61E-01	-7.46E-02
18	1.25	75	1007	75	35.77	331.46216	14.930	0.415	1.49E+01	1.49E+01	4.15E-01	-7.39E-02

4.4. Resultados de calentamiento para las pruebas de tensión

Para realizar el calentamiento de la probeta para las pruebas de tensión se utilizó el método de calentamiento mediante parrilla de gas L.P., debido a que el calentamiento es uniforme en toda la probeta, esto se comprueba con los números de Biot bajos obtenidos en la Tabla 4.4. Se muestra a continuación la tabla obtenida para el calentamiento de las probetas. Se realizaron 3 variaciones de parámetros, con tres corridas cada una, primero a una potencia de flama de 50% y una masa de arena de 1 kg, después a una potencia de 75% a la misma masa de arena de 1 kg y finalmente a la potencia 75% y una masa de 1.25 kg, con lo cual se obtuvieron 9 pruebas óptimas, distribuidas en 3 para cada uno de los parámetros citados anteriormente. No se seleccionaron los parámetros de potencia de 25% ni la masa de 0.5 kg, debido a que a una potencia baja como la citada se reducía la temperatura tan rápidamente que al momento de retirar la probeta de la arena y montarla para el tiempo que se tomaron dichas actividades la probeta iba a estar a una temperatura muy baja cercana a la temperatura ambiente y no iba a generar ningún resultado apreciable en las propiedades mecánicas.

Las siguientes gráficas muestran el calentamiento para cada parámetro seleccionado, obsérvese que en cada una de las curvas se dio un tiempo de estabilidad de temperatura para asegurar la uniformidad de calentamiento, también se puede apreciar que la parte del enfriamiento es muy abrupta comparada con el calentamiento. La adquisición de datos se detuvo una vez terminada la prueba de tensión correspondiente.

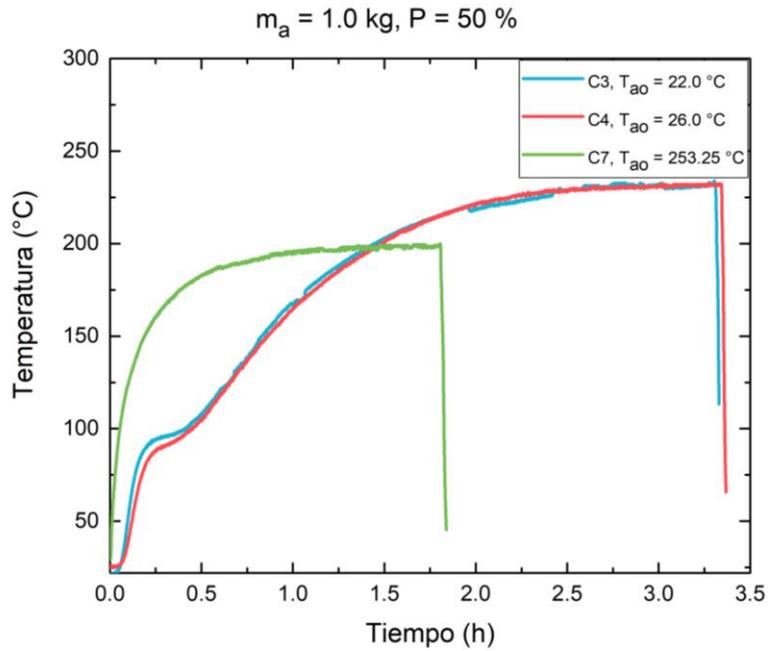


Figura 4.6. Curva de calentamiento para una masa de 1.0 kg y una apertura de potencia de 50%

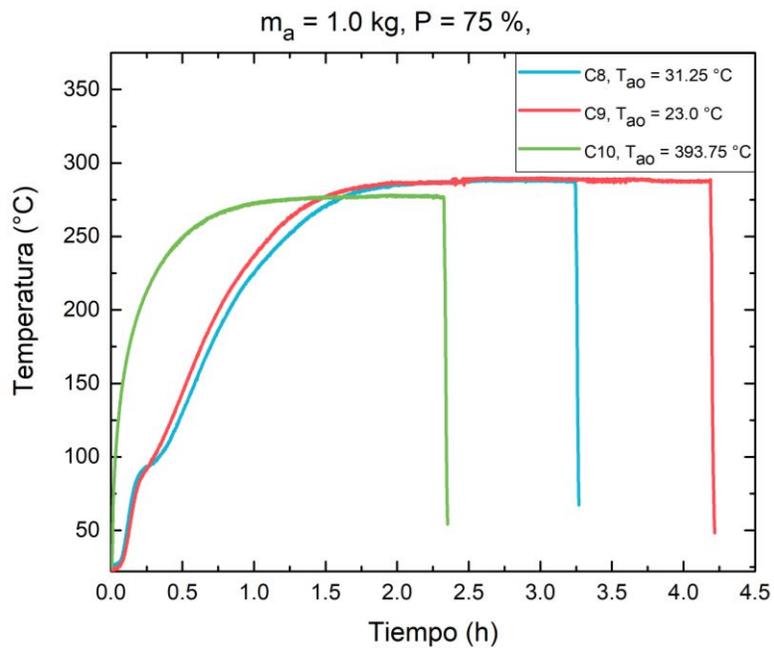


Figura 4.7. Curva de calentamiento para una masa de 1.0 kg y una apertura de potencia de 75%

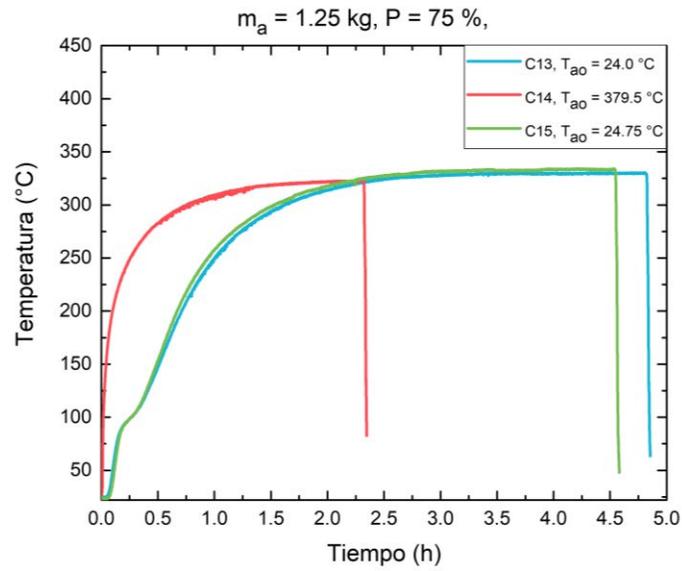


Figura 4.8. Curva de calentamiento para una masa de 1.25 kg y una apertura de potencia de 75%

A continuación, se muestran las probetas después de haberse realizado las pruebas de tensión de izquierda a derecha el orden de las pruebas, se puede apreciar la deformación final de las probetas y el punto de ruptura.



Figura 4.9. Probetas después de las pruebas de tensión

Tabla 4.6. Datos de calentamiento mediante parrilla de gas para pruebas de tensión

Prueba	m_a (kg)	Pot_gas (%)	Patm (hPa)	hr (%)	T_inf(°C)	T_i	b(s^-1)	Tiempo_tot (h)	h (W/m^2-°C)	Bi	Fo	Q (kJ)
3	1	50	1014	88	237.01	21.75	1.373	3.042	5.53E+03	5.31E-02	2.83E+05	3.67
4	1	50	1016	88	237.00	24.75	1.465	2.857	5.90E+03	5.66E-02	2.66E+05	3.62
7	1	50	1019	92	196.65	29.25	4.044	1.2813	1.63E+04	1.56E-01	1.19E+05	2.86
8	1	75	1013	94	300.61	26.75	1.701	2.081	6.85E+03	6.57E-02	1.94E+05	4.67
9	1	75	1012	100	292.38	24	2.146	2.311	8.65E+03	8.29E-02	2.15E+05	4.58
10	1	75	1010	19	275.81	25	3.748	1.724	1.51E+04	1.45E-01	1.61E+05	4.28
13	1.25	75	1015	87	330.97	24.75	1.613	2.941	6.50E+03	6.23E-02	2.74E+05	5.23
14	1.25	75	1018	45	319.66	24.75	2.651	1.586	1.07E+04	1.02E-01	1.48E+05	5.03
15	1.25	75	1017	59	319.66	24	2.651	3.335	1.07E+04	1.02E-01	3.11E+05	5.05

4.5. Resultados de las pruebas de tensión

Como se puede apreciar en la **¡Error! No se encuentra el origen de la referencia.** las pruebas que se realizaron a temperatura ambiente se encuentran con valores cercanos 220 MPa en los valores de esfuerzo, conforme se le aplica calor controladamente se puede apreciar una disminución del esfuerzo y un incremento en la deformación, reduciéndose el esfuerzo hasta un 50 % al llegar a la temperatura de equilibrio de la probeta de 319 °C, además de que se alcanzó un incremento máximo en la deformación a esa temperatura de aproximadamente un 50 %.

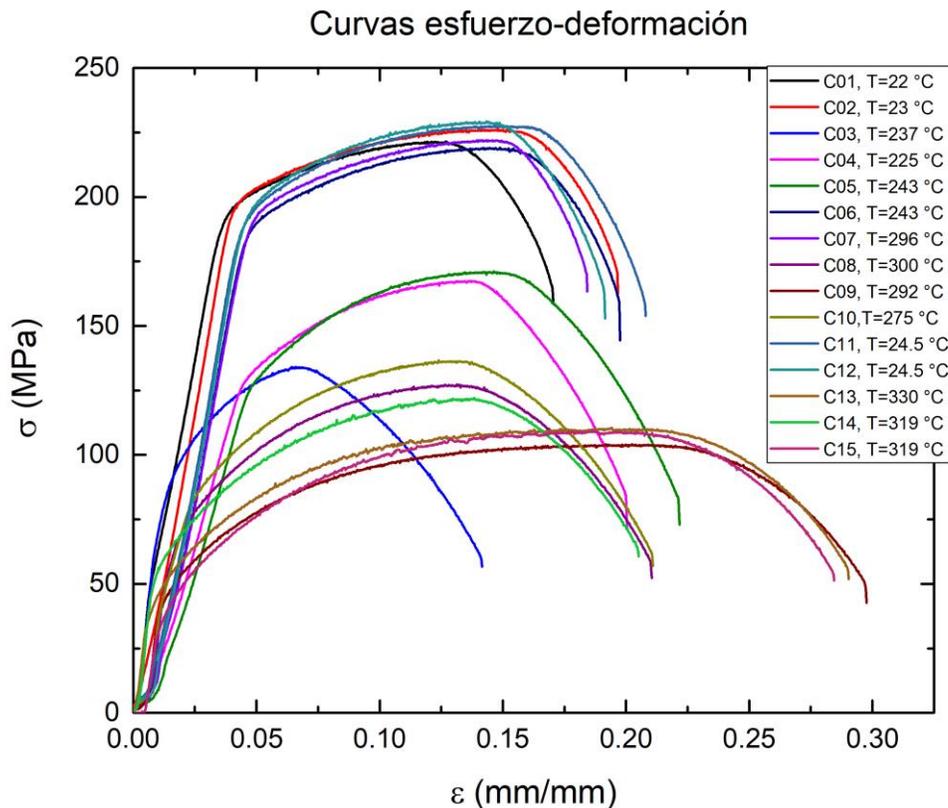


Figura 4.10. Curvas esfuerzo-deformación a diversas temperaturas, obtenidas de ensayos de tensión

La siguiente tabla muestra los resultados obtenidos en las pruebas de tensión.

Tabla 4.7. Propiedades mecánicas obtenidas de las pruebas de tensión a diferentes temperaturas para el aluminio 6061

Corrida	Máx_Carga (kN)	Máx_Esfuerzo (N/mm ²)	Máx_desplazamiento (mm)	Máx_Deformación (mm/mm)	Alargamiento (%)	Tiempo (s)	Temperatura Máx (°C)
1	8.70625	221.488	6.439	12.3827	7.84616	35.5	22
2	8.98438	226.364	7.694	14.7962	5.48077	40.95	23
3	5.39063	134.115	3.421	6.57885	15.6346	29.5	237
4	6.80312	167.4	6.971	13.4058	4.3077	41.75	237
5	6.49062	171.166	7.605	14.625	12.3654	46.15	225
6	8.43125	219.086	7.408	14.2462	10.1923	41.15	243
7	8.575	222.075	7.4205	14.2702	7.69231	38.4	196
8	5.02187	127.34	7.089	13.6327	15.3846	45.5	300
9	4.075	104.202	10.248	19.7077	-1.9231	61.95	292
10	5.32188	136.736	6.444	12.3923	19.2308	43.95	275
11	8.425	227.58	7.629	14.6712	10.7115	43.3	24.5
12	8.4625	229.37	7.455	14.3365	5.61538	39.85	24.5
13	4.24062	110.496	10.101	19.425	22.5577	60.45	330
14	4.46875	122.122	7.196	13.8385	6.28846	42.75	319
15	4.0875	109.217	9.694	18.6423	29.7692	59.25	319

Capítulo 5. Conclusiones

Al término de este proyecto se logró obtener una hipótesis positiva, debido a que el incremento de temperatura por debajo del punto de recristalización, ayuda a reducir el esfuerzo e incrementar la deformación lo cual ayuda a tener mayor ductilidad en los metales, en este caso en el aluminio 6061, se pudo reducir hasta en un 50% el esfuerzo e incrementar en aproximadamente un 50% respectivamente la deformación, lo cual puede ayudar a mejorar los procesos de formado mecánico tales como estampado, embutido, engargolado, entre otros. También se aprecia que se requiere una cantidad considerable de tiempo para calentar las probetas utilizando el método mediante la parrilla de gas y arena, este método alternativo de calentamiento de bajo presupuesto podría ser utilizado en laboratorios que no cuenten con presupuesto para adquirir una cámara de calentamiento controlado, cabe señalar que las pruebas no se mantienen a una temperatura fija, si no que la probeta una vez retirada de la arena, comienza a perder calor y esto se ve reflejado en un descenso abrupto de temperatura, pero debido a la geometría y forma de calentamiento de la probeta, esta mantiene uniforme su temperatura a lo largo de toda su sección.

Al realizar diferentes dispositivos de calentamiento y comparar su funcionalidad, se observa que los dos primeros métodos fueron descartados debido a que no calentaban uniformemente la probeta, y uno de los objetivos planteados era encontrar un método de calentamiento uniforme y controlado. Para poder obtener los datos se requirió de conocimientos en programación y electrónica para construir los dispositivos de cada uno de los métodos de calentamiento.

Es de suma importancia conocer el comportamiento de la temperatura en los periodos de tiempo que se requieren tanto para calentar como enfriar las probetas, ya que con ello se obtiene una función matemática que se utiliza para conocer el tan importante número de Biot que ayuda a conocer si la pieza tiene un calentamiento uniforme.

Bibliografía

- [1] M. Vrolijk, D. Lorenz, H. Porzner y H. Martin, «Supporting lightweight design: virtual modeling of hot stamping,» de *17th International Conference on Sheet Metal, SHEMET17*, Chicago, IL., 2017.
- [2] J. Hirsch, «Aluminium in innovative light-weight car design,» *Mater Trans*, nº 52, p. 818–824, 2011.
- [3] N. Harrison, P. Friedman y J. Pan, «Warm forming die design, Part III: design and validation of a warm forming die,» *J of Manuf Process*, nº 20, p. 356–66, 2015.
- [4] F. Pourboghrata, S. Venkatesan y J. E. Carsley, «LDR and hydroforming limit for deep drawing of AA5754 aluminum sheet,» *J Manuf Process*, nº 15, p. 600–15, 2013.
- [5] J. Martins, D. Neto, J. Alves, M. Oliveira, H. Laurent y A. Andrade-Campos, «A new staggered algorithm for thermomechanical coupled problems,» *Int J Solids Struct*, nº 42-58, p. 122–123, 2017.
- [6] T. Abovyan, G. Kridli, P. Friedman y G. Ayoub, «Formability prediction of aluminum sheet alloys under isothermal forming conditions,» *J Manuf Process*, nº 20, p. 406–13, 2015.
- [7] A. Taylan y J. Long, «Forming aluminum alloys at elevated temperatures,» *The Stamping Journal*, 2015.
- [8] V. Simões, M. C. Oliveira y H. M. L. Laurent, «The punch speed influence on warm forming and springback of two Al-Mg-Si,» *Journal of Manufacturing Processes*, vol. 38, pp. 266-278, 2019.
- [9] C. Zhengyang, M. Wan y L. Zhigang, «Thermal-mechanical behaviors of dual-phase steel,» *International Journal of Mechanical Sciences*, 2017.
- [10] G. Rodríguez, «<https://www.liderempresarial.com>,» *Líder Empresarial*, 13 Febrero 2019. [En línea]. Available: <https://www.liderempresarial.com/san-luis-potosi-el-estado-que-marca-la-pauta/>.
- [11] J. Davis, *Tensile Testing*, ASM International, 2004.

- [12] J. H. William Smith, Foundations of Materials Science and Engineering, sixth edition, McGraw-Hill Education, 2019.
- [13] R. C. Hibbeler, Mecánica de materiales 8va edición, Prentice Hall, Inc., 2011.
- [14] D. R. Askeland, Ciencia e ingeniería de los materiales, 3ra edición, International Thomson Editores, 1998.
- [15] E. R. J. J. T. D. D. F. M. Ferdinand P. Beer, Mecánica de Materiales Quinta edición, The McGraw-Hill Companies, 2010.
- [16] G. Dieter, Mechanical Metallurgy, 3ra ed., McGraw-Hill, 1986.
- [17] J. F. Shackelford, Introducción a la ciencia de los materiales para ingenieros, 6ta edición, Pearson Education, Inc, 2005.
- [18] R. M. M. M. S. B. Frank Kreith, Principios de transferencia de calor 7ma edición, Cengage Learning Editores, S.A. de C.V., 2012.
- [19] A. S. L. F. P. I. D. P. D. Theodore L. Bergman, Fundamentals of Heat and Mass Transfer, John Wiley & Sons, Inc., 2011.
- [20] Y. A. Cengel, Transferencia de calor y masa 4ta edición, The McGraw-Hill Companies, 2011.
- [21] J. F. Mora, Máquinas eléctricas sexta edición, Mc Graw Hill, 2008.
- [22] S. J. Chapman, Máquinas eléctricas Quinta edición, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2012.
- [23] J. Nussey, Arduino for Dummies, Hoboken, New Jersey: Wiley & Sons, Inc, 2018.
- [24] J. Blum, Exploring Arduino. Tools and Techniques for Engineering Wizardry, Second Edition, John Wiley & Sons, 2020.
- [25] C. Bell, Sensor Networks with Arduino and Raspberry Pi, Springer Science, 2013.
- [26] A. Kurniawan, Arduino Leonardo and Arduino Micro: A Hands-On Guide for Beginner, 2016.
- [27] ASTM International, «Standard Test Methods for Tension Testing of Metallic Materials,» *American Association State Highway and Transportation Officials Standard*, 2013.

- [28] Secretaría de Desarrollo Económico, «Industria Metal-Mecánica en el Estado de San Luis potisi,» Secretaría de Desarrollo Económico, San Luis Potosí, S.L.P., 2011.
- [29] R. Nisbett, B. G. y J. Keith, Shigley's Mechanical Engineering Design 9th edition, The McGraw-Hill Companies, Inc., 2011.
- [30] D. C. Montgomery, Diseño y análisis de experimentos 2da edición, Lumisa Wiley, 2004.
- [31] W. D. Callister, Introducción a la ciencia e ingeniería de los materiales, Reverté, S.A..
- [32] G. P. Rodríguez, «Determinación Experimental de la Conductividad,» *Revista Ciencia en Desarrollo*, vol. 5, nº 1, pp. 15-20, 2014.