

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**



**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL**

**TEMA:**

---

**“CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE ACERO QUE HAYAN SIDO EXPUESTOS A DIFERENTES TIEMPOS Y TEMPERATURAS DEBIDO A UN INCENDIO”**

---

Trabajo de Titulación previo a la obtención del grado académico de Magister en Ingeniería Civil con mención en Estructuras Metálicas.

Modalidad de titulación: Proyecto de titulación con componentes de investigación aplicada y/o de desarrollo.

**Autora:** Ing. Fernanda Patricia Guamanquispe Vaca

**Director:** Ing. Segundo Manuel Espín Lagos, Mg

Ambato – Ecuador

2022

## **APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

A la Unidad de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica.'

El Tribunal receptor de la Defensa del Trabajo de Titulación presidido por Ingeniero, Santiago Medina, Mg, e integrado por los señores: Ing. Gonzalo Eduardo López Villacis, Mg. e Ing. Christian Byron Castro Miniguano, Mg. designados por la Unidad Académica de Titulación de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato, para aceptar el Trabajo de Titulación con el tema: “CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE ACERO QUE HAYAN SIDO EXPUESTOS A DIFERENTES TIEMPOS Y TEMPERATURAS DEBIDO A UN INCENDIO” elaborado y presentado por la señorita, Ingeniera, Fernanda Patricia Guamanquispe Vaca, para optar por el Grado Académico de Magister en Ingeniería Civil con mención en Estructuras Metálicas; una vez escuchada la defensa oral del Trabajo de Titulación el Tribunal aprueba y remite el trabajo para uso y custodia en las bibliotecas de la Universidad Técnica de Ambato.

-----  
Ingeniero, Santiago Medina Robalino, Mg  
Presidente y Miembro del Tribunal de Defensa

-----  
Ing. Gonzalo Eduardo López Villacis, Mg.  
Miembro del Tribunal de Defensa

-----  
Ing. Christian Byron Castro Miniguano, Mg.  
Miembro del Tribunal de Defensa

## **AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN**

La responsabilidad de las opiniones, comentarios y críticas emitidas en el Trabajo de Titulación presentado con el tema: “CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE ACERO QUE HAYAN SIDO EXPUESTOS A DIFERENTES TIEMPOS Y TEMPERATURAS DEBIDO A UN INCENDIO”, le corresponde exclusivamente a: Ing. Fernanda Patricia Guamanquispe Vaca Autora bajo la Dirección de Ing. Espín Lagos Segundo Manuel, Mg, Director del Trabajo de Investigación; y el patrimonio intelectual a la Universidad Técnica de Ambato.

-----  
Ing. Fernanda Patricia Guamanquispe Vaca

**AUTORA**

-----  
Ing. Segundo Manuel Espín Lagos, Mg

**DIRECTOR**

## **DERECHOS DE AUTOR**

Autorizo a la Universidad Técnica de Ambato, para que el Trabajo de Titulación, sirva como un documento disponible para su lectura, consulta y procesos de investigación, según las normas de la Institución.

Cedo los Derechos de mi Trabajo de Titulación, con fines de difusión pública, además apruebo la reproducción de este, dentro de las regulaciones de la Universidad Técnica de Ambato.

-----  
Ing. Fernanda Patricia Guamanquispe Vaca

C.I.180433859-6

## INDICE GENERAL

PORTADA.....	i
APROBACIÓN DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	ii
AUTORÍA DEL TRABAJO DE TITULACIÓN .....	iii
DERECHOS DE AUTOR .....	iv
INDICE GENERAL.....	v
INDICE DE TABLAS .....	vii
ÍNDICE DE FIGURAS.....	viii
AGRADECIMIENTO .....	xi
DEDICATORIA .....	xii
RESUMEN EJECUTIVO .....	xiii
EXECUTIVE SUMMARY.....	xv
CAPÍTULO I.....	1
EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN.....	1
1.1 Introducción .....	1
1.2 Justificación.....	2
1.3 Objetivos .....	3
1.3.1 General .....	3

1.3.2 Específicos .....	3
CAPITULO II .....	4
ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS.....	4
CAPITULO III.....	30
MARCO METODOLÓGICO .....	30
3.1 Ubicación .....	30
3.2 Equipos y materiales .....	30
3.3 Material Bibliográfico.....	30
3.4 Materiales de oficina.....	30
3.5 Equipos.....	30
3.6 Tipo de investigación .....	30
3.7 Prueba de Hipótesis - pregunta científica – idea a defender .....	32
3.8 Demostración de la hipótesis para .....	33
CAPITULO IV.....	37
RESULTADOS Y DISCUSIÓN .....	37
CAPÍTULO V .....	63
CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES .....	63
5.1 Conclusiones .....	63
5.2 Recomendaciones.....	64
Bibliografía .....	65

Anexos .....	68
--------------	----

## INDICE DE TABLAS

Tabla 1. Fuentes de Ignición [11]. .....	13
Tabla 2. Propiedades de los aceros según la ASTM [10]. .....	18
Tabla 3. Coeficientes de corrección con la temperatura de las características mecánicas de los aceros estructurales al carbono [18]. .....	25
Tabla 4. Resistencia obtenida versus Resistencia esperada .....	33
Tabla 5. Probabilidad de la Normal Estándar .....	34
Tabla 6. Datos de Chi Cuadrado .....	35
Tabla 7. Resultados de ensayo de Dureza Brinell.....	37
Tabla 8. Resultados de ensayo de Metalografía.....	39
Tabla 9. Dureza de la aleación ferrita + perlita.....	54
Tabla 10. Resistencia de los promedios de HB.....	56
Tabla 11. Coeficiente de temperaturas.....	59

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Proceso de Transferencia de calor [11]. .....	11
Figura 2. Curva normalizada Temperatura - Tiempo de un incendio [2]. .....	12
Figura 3. Representación de una Ignición dirigida [13]. .....	13
Figura 4. Fases de evolución del fuego [11]. .....	15
Figura 5. Probeta de ensayo a Tensión [12]. .....	20
Figura 6. Grafica esfuerzo – deformación [18]. .....	21
Figura 7. Probeta V600-1 a distintos aumentos. ....	41
Figura 8. Tamaño de grano 7.03 um .....	42
Figura 9. Probeta V600-2 a distintos aumentos. ....	42
Figura 10. Tamaño de grano 7.66 um .....	42
Figura 11. Probeta V600-3 a distintos aumentos. ....	43
Figura 12. Tamaño de grano 6.84 um .....	43
Figura 13. Probeta C800-1 a distintos aumentos. ....	43
Figura 14. Tamaño de grano 8.20 um .....	44
Figura 15. Probeta V800-1 a distintos aumentos. ....	44
Figura 16. Tamaño de grano 8.53 um .....	44
Figura 17. Probeta C800-2 a distintos aumentos. ....	45
Figura 18. Tamaño de grano 8.27 um .....	45



Figura 19. Probeta V800-2 a distintos aumentos. ....	45
Figura 20. Tamaño de grano 8.24 um .....	46
Figura 21. Probeta C800-3 a distintos aumentos. ....	46
Figura 22. Tamaño de grano 8.15 um .....	46
Figura 23. Probeta V800-3 a distintos aumentos. ....	47
Figura 24. Tamaño de grano 7.34 um .....	47
Figura 25. Probeta C1000-1 a distintos aumentos. ....	47
Figura 26. Tamaño de grano 7.67 um .....	48
Figura 27. Probeta K1000-1 a distintos aumentos. ....	48
Figura 28. Tamaño de grano 7.72 um .....	48
Figura 29. Probeta V1000-1 a distintos aumentos. ....	49
Figura 30. Tamaño de grano 8.15 um .....	49
Figura 31. Probeta C1000-2 a distintos aumentos. ....	49
Figura 32. Tamaño de grano 8.29 um .....	50
Figura 33. Probeta K1000-2 a distintos aumentos. ....	50
Figura 34. Tamaño de grano 7.93 um .....	50
Figura 35. Probeta V1000-2 a distintos aumentos. ....	51
Figura 36. Tamaño de grano 8.01 um .....	51
Figura 37. Probeta C1000-3 a distintos aumentos. ....	51
Figura 38. Tamaño de grano 7.51 um .....	52

Figura 39. Probeta K1000-3 a distintos aumentos. ....	52
Figura 40. Tamaño de grano 8.43 um .....	52
Figura 41. Probeta V1000-3 a distintos aumentos. ....	53
Figura 42. Tamaño de grano 8.55 um .....	53
Figura 43. Resistencia Vs Tiempo de exposición a diferentes Temperaturas.....	57
Figura 44. Esfuerzo de Fluencia Vs Temperatura de exposición del Acero .....	60
Figura 45. % de Capacidad de carga en diferentes temperaturas.....	62

## **AGRADECIMIENTO**

A DIOS, por su amor, fidelidad y por siempre darme fuerzas para seguir adelante en cada etapa de mi vida.

A mis PADRES, por darme siempre su apoyo incondicional y ser un ejemplo a seguir; por guiarme por el camino correcto, por ser los segundos padres de mi hijo y enseñarme las cosas más importantes de la vida.

A mi HIJO, porque él fue el motor que me impulso a seguir adelante por este largo camino.

A cada uno de los integrantes de mi FAMILIA, por brindarme su apoyo en la realización de este trabajo.

A mi Tutor Ing. Segundo Espín por su asesoría y colaboración en la consecución de este proyecto.

A mis amigos y compañeros de toda la vida, por todo el apoyo brindado a lo largo de este camino.

## **DEDICATORIA**

En primer lugar, al ser que hizo capaz la culminación de esta etapa de mi vida, Dios  
mi Padre dueño de mi vida.

A mi amado Padre, por haber sido el mejor maestro a lo largo de toda mi vida, por  
compartir cada momento conmigo y ser siempre mi ejemplo a seguir.

Al ser más importante en mi vida mi hijo, que en este camino estuvo presente y con  
solo saber de su existencia me empujaba a no detenerme y seguir adelante para ser su  
ejemplo en la vida.

A mi querida Madre, por nunca dejarme sola y ser un apoyo incondicional en cada  
etapa de mi vida.

A mi familia en general que de una forma u otra me han apoyado en varios  
momentos.

A mis amigos y conocidos que me han acompañado en ésta importante etapa.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA - CENTRO DE  
POSGRADOS**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - MENCIÓN ESTRUCTURAS  
METÁLICAS**

**TEMA: “CARACTERIZACIÓN DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE  
ACERO QUE HAYAN SIDO EXPUESTOS A DIFERENTES TIEMPOS Y  
TEMPERATURAS DEBIDO A UN INCENDIO”**

**AUTORA:** Ing. Fernanda Patricia Guamanquispe Vaca

**DIRECTOR:** Ing. Segundo Manuel Espín Lagos, Mg

**LÍNEA DE INVESTIGACIÓN:** Construcción, estructuras, vías y transporte

**FECHA:** 21 de febrero de 2022

**RESUMEN EJECUTIVO**

En el presente trabajo investigativo se caracterizaron diferentes elementos estructurales de acero que han sido expuestos a diferentes tiempos y temperaturas, tales como columnas, vigas y correas de acero ASTM A 36 expuestos a flagelos, considerando diferentes tiempos y temperaturas de exposición; Para la parte experimental se simuló las condiciones mediante la utilización de un horno convencional en el que se colocaron varias muestras de acero y material combustible tratando de simular un flagelo real, luego de lo cual se tomaron muestras a temperaturas de 600, 800 y 1000 grados centígrados y tiempos de exposición de 30, 45 y 60 minutos, a las que se realizaron ensayos de dureza y macroscopia en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica para poder determinar las propiedades mecánicas del material sometidos bajo estas condiciones y compararlas con las del material no expuesto; mediante la dureza se pudo determinar la resistencia ultima del material y a partir de los porcentajes de Ferrita y Perlita

también se verificó que la resistencia última a la tracción aumentó en un 9-10 por ciento, ya que las muestras fueron enfriadas mediante chorro de agua fría, condición que se da cuando se apaga un incendio; si bien es cierto que las propiedades mecánicas de las probetas no varió significativamente, de la revisión bibliográfica se pudo determinar que en tiempo real del flagelo, la resistencia a la fluencia disminuye en proporción inversa con la temperatura por lo que es posible que la estructura colapse en ese momento, de lo anteriormente mencionado se puede decir también que si la estructura no colapsa durante el incendio y sigue en pie y sin deformaciones en la estructura, la misma puede seguir prestando servicio; Por último después del análisis se pudo concluir que las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de acero en el momento del incendio dependen del tiempo y temperatura de exposición del mismo.

**Descriptor:** Acero A36, incendio, metalografía, dureza, características del acero, resistencia última, límite de fluencia, porcentaje de fases, temperatura del acero, tamaño de grano, elementos estructurales.

**UNIVERSIDAD TÉCNICA DE AMBATO**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y MECÁNICA - CENTRO DE  
POSGRADOS**

**MAESTRÍA EN INGENIERÍA CIVIL - MENCIÓN ESTRUCTURAS  
METÁLICAS**

**THEME:**

**“CHARACTERIZATION OF STEEL STRUCTURAL ELEMENTS THAT  
HAVE BEEN EXPOSED TO DIFFERENT TIMES AND TEMPERATURES  
DUE TO A FIRE”**

**AUTHOR:** Ing. Fernanda Patricia Guamanquispe Vaca

**DIRECTED BY:** Ing. Segundo Manuel Espín Lagos

**LINE OF RESEARCH:** Construction, structures, roads and transportation

**DATE:** 21 de febrero de 2022

**EXECUTIVE SUMMARY**

In the present investigative work, different structural elements such as columns, beams and steel straps ASTM A 36 exposed to flagella were characterized, considering different times and temperatures of exposure; For the experimental part, the conditions were simulated by using a conventional furnace in which several samples of steel and combustible material were placed, trying to simulate a real scourge, after which samples were taken at temperatures of 600, 800 and 1000 degrees celsius and exposure times of 30, 45 and 60 minutes, to which hardness and macroscopy tests were carried out in the materials laboratory of the Faculty of Civil and Mechanical Engineering and to be able to determine the mechanical properties of the material subjected under these conditions and compare them with those of the unexposed material; By means of the hardness it was possible to determine the ultimate resistance of the material and from the percentages of Ferrite and Perlite it was also verified that the ultimate resistance to

traction increased by 9-10 percentage since the samples were cooled by means of a cold water jet, a condition that occurs when a fire is extinguished; Although it is true that the mechanical properties of the specimens did not vary significantly, from the bibliographic review it was possible to determine that in real time of the flagellum, the resistance to creep decreases in inverse proportion with the temperature, so it is possible that the structure collapses. At that time, from the aforementioned, it can also be said that if the structure does not collapse during the fire and is still standing and without deformations in the structure, it can continue to provide service; Finally, after the analysis, it was possible to conclude that the mechanical properties of the structural steel elements at the time of the fire depend on the time and temperature of its exposure.

**Keywords:** A36 steel, fire, metallography, hardness, steel characteristics, ultimate strength, yield strength, percentage of phases, steel temperature, grain size, structural elements.



## **CAPÍTULO I**

### **EL PROBLEMA DE INVESTIGACIÓN**

#### **1.1 Introducción**

Las estructuras metálicas debido a sus propiedades mecánicas se han convertido en el material líder en el mundo de la construcción. La mayor ventaja de trabajar con estructuras de acero es la optimización de tiempo ya que los elementos estructurales son preparados en planta y solo se lleva a obra a su montaje, con ajustes mínimos. Además de ser más ligeras y más resistentes la fiabilidad y seguridad de poder dar paso a los deseos arquitectónicos [1].

La principal necesidad de la estructura metálica es la de protección contra el fuego, ya que el acero a pesar de no ser un material de combustión es conductor de calor y dependiendo su composición es necesario un estudio del comportamiento de este enfrente a altas temperaturas como las de un incendio, ya que nos permitirá precautelar vidas en un siniestro, después de ocurrido el incidente en el World Trade Center de EE.UU. la normativa FEMA 403 determinó un análisis detallado de estructuras sometidas a altas temperaturas y de ella se han derivado algunas normativas que nos ayudan al estudio de este caso como ASTM E119 secciones 5,6,7 ASTM D 573, ASTM D 671-90, entre otras [2].

Como parte del trabajo se detalla el análisis del comportamiento de aceros expuestos a diferentes tiempos y temperaturas, mostrándose en este el cambio de las propiedades mecánicas que sufren estos después de haber sido sometidos a un incendio, esto se lo hace a través de ensayos metalográficos de las muestras que previamente han sido preparadas, teniendo en cuenta la curva recomendada por ISO y adoptada por ASTM que muestra un importante aumento de la temperatura en los primeros minutos, por

otra parte, es sabido que el acero pierde gradualmente su resistencia a partir de los 300°C hasta alcanzar aproximadamente el 60% de su resistencia inicial a los 550°C.

En la actualidad no hay una normativa enfocada en el diseño y construcción de edificaciones contra fuego. En la NEC solo se menciona el incendio como carga accidental, pero no existen procedimientos de diseño estructural. Por esta razón se investiga el estado límite de resistencia de diferentes elementos estructurales de acero expuestos a distintas cargas de temperaturas en distintos tiempos. Debido a que constituyen un riesgo grave para los ocupantes de las estructuras.

## **1.2 Justificación**

Uno de los materiales más utilizados para la construcción a nivel mundial es el acero estructural, como también lo es el hormigón, en los países donde la población es demasiado densa se ha optado por aprovechar los espacios al máximo, la necesidad de crecer de las poblaciones ha conllevado a pensar en construcciones de estructuras de gran altitud y con una optimización de recursos.

El desarrollo de esta investigación se ve justificado por muchos aspectos, uno de ellos es el grado de importancia, ya que al finalizar el mismo se podrá disponer de información sobre el comportamiento de las estructuras metálicas que han sido sometidas a altas temperaturas, se podrá comparar las propiedades mecánicas reales después del incendio con muestras no expuestas a fuego. Se determina la importancia de un diseño constructivo contra fuego [1].

Las estructuras de acero precisan ser protegidas, de forma que quede recubiertas por elementos que retarden la acción del fuego en ellas. Esto debido a que los perfiles metálicos presentan un comportamiento poco adecuado frente al fuego, resistiendo sin deformarse menos tiempo que las estructuras de ladrillo, de madera u hormigón armado. La protección puede ser en un recubrimiento de materiales ignífugos proyectados, o bien en el confinamiento de elementos metálicos en cuerpos resistentes al fuego. En definitiva, estas soluciones resisten la acción del fuego durante un período de tiempo suficiente para facilitar la evacuación y las tareas de extinción, antes de que las altas temperaturas deformen el material e invaliden su capacidad resistente [3].

El presente proyecto asociara un Panorama Crítico Propositivo por lo que fue un suceso inesperado de tal forma que las investigaciones sobre el comportamiento de la estructura metálica expuestas al fuego serán afectadas debido a que altas temperaturas de calor provocaran que las muestras lleguen a fallar, al caracterizar elementos estructurales de acero que hayan sido expuestos a diferentes tiempos y temperaturas producidas por un incendio [4].

En esta investigación las implicaciones son de carácter económico y social en la primera la importancia de proteger las estructuras de un siniestro de incendio puede asegurar la reestructuración de la misma después del conato, y la segunda es la de salvaguardar vidas durante el siniestro.

El objetivo de este estudio es la investigación de la vida útil de las estructuras después de sufrir cambios en sus características de composición al ser expuestas a altas temperaturas, teniendo en cuenta el tiempo y la duración de este evento, para concluir una reestructuración o el derrocamiento de la estructura.

### **1.3 Objetivos**

#### **1.3.1 General**

Caracterizar diferentes elementos estructurales de acero que hayan sido expuestos a diferentes tiempos y temperaturas producidas por un incendio.

#### **1.3.2 Específicos**

- Determinar cómo han variado las propiedades mecánicas de elementos estructurales de acero luego de que han sufrido un incendio.
- Comparar las propiedades mecánicas del acero expuesto a diferentes tiempos y temperaturas, con las propiedades mecánicas del material no expuesto.
- Determinar el porcentaje de afectación del acero

## **CAPITULO II**

### **ANTECEDENTES INVESTIGATIVOS**

La presente información ha sido extraída de las siguientes fuentes, considerando las más importantes de una amplia fuente de información.

Según, Lapuebla- Ferri, Pons y Romero [5], en su artículo Influencia de la carga y la temperatura en las propiedades mecánicas posteriores al incendio de los refuerzos de acero con fecha de publicación Octubre 2021, realizó un estudio experimental de las propiedades mecánicas residuales de los esfuerzos de acero expuestos a altas temperaturas, las muestras fueron sometidas simultáneamente a una carga y ciclo térmico que consistía en elevar la temperatura objetivo y a enfriar a temperatura ambiente. Seguidamente, se obtuvieron las propiedades mecánicas sometiendo las probetas a tracción hasta el fallo. Se realizaron cuatro tipos de pruebas: 1) pruebas en estado estacionario para obtener las propiedades de las armaduras a altas temperaturas; 2) ensayos en estado transitorio para medir la temperatura crítica a la que falla una armadura cuando se somete a la acción simultánea de carga y aumento de temperatura; 3) ensayos en probetas sin carga bajo un ciclo térmico (calentamiento y enfriamiento a temperatura ambiente) y 4) el mismo ciclo térmico actuando simultáneamente con una carga aplicada. Se realizaron un total de 5 ensayos con el fin de obtener las propiedades mecánicas de las probetas a temperatura ambiente. Los elementos restantes deben verificar los requisitos de seguridad de los códigos actuales basados en el rendimiento, pero de ellos. Los resultados arrojaron que el comportamiento mecánico de las armaduras dependía no solo de la temperatura máxima alcanzada, sino también de la carga a la que fue sometida durante el ciclo térmico. Las barras de refuerzo calentadas hasta 500°C y luego enfriadas mostraron una pérdida insignificante de límite elástico y resistencia última. Sin embargo, la ductilidad

residual se redujo significativamente a esta temperatura límite. En general, se observó una pérdida de ductilidad cuando aumenta el nivel de carga, especialmente para temperaturas objetivo de 500°C y 600°C.

Según Ramos y otros [6], Este documento EFECTOS DEL FUEGO SOBRE LA RESISTENCIA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE HORMIGÓN ARMADO: UNA REVISION DE LITERATURA, publicado en Abril de 2021, en Perú, tiene como objetivo realizar una revisión sistemática de los efectos que tiene el fuego en las propiedades mecánicas y térmicas de las estructuras de hormigón armado. El acero que ha sido expuesto a cargas de altas temperaturas sufrirá deformación mecánica, deformación térmica y deformación por fluencia, la fuerza comienza a disminuir a partir de los 400°C, y desde el inicio del experimento, la reducción del acero utilizado comienza a partir de los 700°C. Esto se puede presentar por diferencias en la cristalización del acero. Las pruebas realizadas en este análisis fueron 1. Resistencia a la compresión 2. Resistencia a la flexión y 3. Modulo elástico. Los resultados obtenidos de las pruebas de ensayo arrojaron los siguientes resultados. La capacidad de carga de las muestras de hormigón armado disminuye a medida que la temperatura aumenta a 800°C. En comparación con la carga temperatura ambiente, después de calentar a temperaturas de 200°C, 400°C, 600°C y 800°C, el porcentaje de reducción de la carga restante es 24,5%, 38,8%, 63,3% y 83,7%, respectivamente. Las barras de acero tienen una alta conductividad térmica, lo que permite que toda la sección transversal alcance altas temperaturas y pierda resistencia más rápidamente.

Chong et al [7], este artículo de Investigación experimental de las propiedades mecánicas posteriores al incendio del acero conformado en frío Q235, publicado en mayo de 2020 en China, presenta una investigación experimental sobre las propiedades mecánicas post-incendio de aceros conformados en frío. Las muestras de ensayo se cortaron de la parte plana y las esquinas de las secciones del canal formadas en frío, que se expusieron a temperaturas que iban desde la temperatura ambiente hasta los 800 C, y luego se enfriaron con agua y aire. Las probetas fueron 132 muestras de distintos materiales conformados en frío del grado Q235, con espesores de sección de 1mm y 2mm. Las curvas de tensión-deformación y las propiedades mecánicas de las probetas

se obtuvieron a partir de ensayos de tracción. Investigaciones sustanciales sobre material de acero y elementos estructurales en condiciones de incendio se han llevado a cabo, y los resultados se han adoptado en códigos de diseño como el Código Europeo (EC3), Australia Estándar (AS4100) y especificación estadounidense (especificación AISC). Los métodos tienen una influencia importante en el comportamiento mecánico post-incendio de Aceros ASTM A36. Además, los trabajos de investigación fueron presentados en post-incendio el comportamiento de los nudos, acero pretensado, acero de refuerzo, inoxidable, de alta resistencia y laminados en caliente. Los resultados fueron expuestos de las pruebas de propiedades mecánicas posteriores al incendio. Además, se verificó la evolución de la microestructura y la morfología de la fractura de muestras con diferentes métodos de enfriamiento. Los materiales se deterioran a altas temperaturas, lo que genera grandes preocupaciones en su seguridad contra incendios en aplicaciones estructurales.

Zhang y Wang [8], en su publicación Propiedades mecánicas post-incendio de los aceros de alta resistencia Q460 y Q690 después del enfriamiento de la espuma contra incendios, de la investigación en Noviembre de 2020, en este estudio se investigan las propiedades mecánicas posteriores al incendio de los aceros de alta resistencia Q460 y Q690 enfriados mediante espuma contra incendios de siete temperaturas altas diferentes. Las probetas de ensayo se someten desde una temperatura elevada que varía de 200°C hasta 900°C para simular diversas condiciones de incendio y después estas muestras calentadas se enfrían a temperatura ambiente a base de espuma contra incendios. Se realizarán ensayos tanto de resistencia como de ductilidad. Las muestras se determinaron de acuerdo con las pautas dadas en Normas ISO GB / T 228.1-2010 para estos dos tipos diferentes de experimentos de acero de alta resistencia, un total de 48 probetas se prepararon. De cada temperatura se ensayó 3 probetas. El proceso de prueba para investigar las características de la fractura y post-incendio, las propiedades mecánicas de las muestras, se divide en tres etapas: se expone las muestras a temperaturas planteadas, se hace un enfriamiento relativamente rápido con espuma de incendios, y se ensaya a tracción las muestras. El límite elástico de las muestras de acero de alta resistencia Q460 y Q690 está determinada por el método recomendado en GB / T 228.1-2010. En las muestras expuestas a la temperatura de 900°C, los aceros

de alta resistencia Q460 y Q690 alcanzan a recuperar el 67% y el 64% de su resistencia última inicial cuando se le da un enfriamiento de espuma contra incendios, respectivamente. Por otro lado, la ductilidad de los aceros de alta resistencia Q460 y Q690 enfriados desde 900°C mediante espuma contra incendios alcanza un 139% y 152% de su ductilidad inicial, respectivamente.

Hizb Ullah Sajid, Ravi Kiran [9], en la publicación de su artículo Comportamiento mecánico post-incendio de aceros ASTM A572 sometidos a triaxialidades de alta tensión, en julio de 2019, en Estados Unidos, se estudia el comportamiento mecánico posterior al incendio de ASTM A572. Grado 50 de aceros estructurales que han sido sometidos a altas temperaturas y después enfriados mediante aire (forma lenta) o sometiéndolos a un chorro de agua (forma rápida). Las muestras de ensayo con muescas uniaxiales se someten a temperaturas que van entre 500°C y 1000°C a intervalos de 100°C, a diferentes tiempos de exposición de calor, para simular temperaturas de fuego. Se realizan análisis de elementos finitos no lineales para obtener los perfiles de triaxialidad a lo largo de las secciones transversales críticas de las muestras con muescas mediante el empleo de curvas de endurecimiento obtenidas de ensayos de tensión uniaxial posteriores al fuego. Procedimiento, usando FEA, con perfiles de triaxialidad de tensión en secciones transversales críticas de probetas. La variación en las propiedades mecánicas se verificara en el avance. Se observa en ASTM que los aceros A572 no presentan cambios considerables en sus propiedades mecánicas al ser expuestos a temperaturas de hasta 600°C, para los dos métodos de enfriamiento. Más allá de 600°C, en el enfriamiento por aire dio se ve como resultado una reducción en el límite elástico y la resistencia máxima a la tracción y aumento en la ductilidad de los aceros ASTM A572. En el enfriamiento de las probetas por agua desde temperaturas superiores a 600 ° C aumentó la resistencia máxima a la tracción y disminuyó la ductilidad de los aceros ASTM A572 en relación a las condiciones originales, debido a la formación de la fase de martensita. Por otro lado, la presencia de la triaxialidad de alta tensión y el enfriamiento por agua dio como resultado una pérdida de ductilidad de hasta el 89% de las muestras de aceros ASTM A572 que están expuestas a temperaturas superiores a 800°C.

Hizb Ullah y Sajid Ravi Kiran [10], En su publicación en 2018, Estados Unidos, Este análisis tiene como objetivo investigar la influencia de la triaxialidad de la tensión y los métodos de enfriamiento en el comportamiento mecánico post-incendio de los aceros ASTM A36. Estas muestras se someten a temperaturas de 500°C, 600°C, 700°C, 800°C, 900°C y 1000°C, y luego se enfrían a temperatura ambiente utilizando métodos de enfriamiento por aire y por agua. Luego, estas muestras se prueban uniaxialmente para determinar sus propiedades mecánicas post-incendio. Se estudia las propiedades mecánicas de las probetas mediante análisis de elementos finitos, en el cual utilizaremos probetas y un software FEA Abaqus. Se calientan 14 muestras simultáneamente en un solo lote. De estos 14 especímenes, 7 especímenes se enfrían por aire y las otras 7 muestras se enfrían por agua. En 6 condiciones de temperatura diferentes y un estudio de microscopio electrónico de barrido SEM. Los miembros de acero estructural deben cumplir con la clasificación de resistencia al fuego especificado en los códigos de construcción. Estándares de diseño actuales como AISC, ASCE, BS5950, AS 4100, EC3 y CECS200. Las muestras de ensayo típicas fueron preparados y probados de acuerdo con ASTM E8 o Norma ISO (GB / T 228.1-2010) según el tipo de acero estructural y el país en el que se utilice. Se observa que la resistencia a la tracción final después del incendio aumenta hasta en un 146%, mientras que se observa que la deformación por fractura disminuye hasta en un 76% cuando las muestras ASTM A36 se enfrían con agua a altas temperaturas. La triaxialidad de alta tensión dio como resultado un aumento de hasta un 37% en la resistencia a la tracción máxima y una reducción de hasta un 74% en la ductilidad de las muestras enfriadas por aire. Se observa que la presencia de triaxialidad de alta tensión y el enfriamiento por agua desde temperaturas superiores a 700°C aumentan significativamente la resistencia a la tracción final (hasta un 252%) y reducen sustancialmente la ductilidad (hasta un 98%) de los aceros ASTM A36.

Después del análisis determinado de varios autores relevantes con el tema de estudio se procede hacer un análisis más detallado con la contextualización del trabajo de estudio. Para poder comprender el origen y los factores que llevan a que el fuego en una estructura se convierta en un evento sin control, es necesario conocer distintos conceptos relacionados con la combustión y características de los materiales. A



continuación, se darán a conocer una serie de conceptos y definiciones que permitirán en el transcurso de este trabajo describir y analizar casos de incendios reales.

## **Incendio**

“Se define por incendio a la combustión no deseada de uno o varios materiales. Dicha combustión produce la oxidación de dichos materiales, en una reacción que es exotérmica (desprende calor) y de carácter irreversible (el material afectado por esta oxidación queda transformado totalmente, cambiando sus propiedades físico-químicas, sin posibilidad de recuperarlas).”

Un incendio es una manifestación de una combustión sin control. En ella intervienen materiales de combustión que son parte de los edificios en que vivimos, trabajamos y jugamos o una gama de gases, líquidos y sólidos que se utilizan en la industria y el comercio. Materiales, normalmente constituidos por carbono, estos se asociarán en el fondo de este estudio bajo la denominación de sustancias combustibles. Aunque estas presentan gran variedad en cuanto a su estado químico y físico, cuando intervienen en un flagelo responden a características comunes, si bien se diferencian en la facilidad con que se inicia éste (ignición), la velocidad de propagación de la llama y la intensidad del mismo (velocidad de liberación de calor) [11].

## **Combustión o fuego**

Para que se produzca y/o se mantenga el fuego está condicionado por algunos factores. La falta de una de las siguientes condiciones; produce automáticamente a la extinción del mismo. Según la teoría del tetraedro de fuego, estas cuatro condiciones son:

- 1) Calor: Para que ocurra la activación del elemento es necesario llegar a la temperatura suficiente y adecuada. La temperatura de ignición es una de las características propias de cada material. Es la temperatura a la cual se inflaman los gases desprendidos por el material combustible hasta reducir el material a cenizas.
- 2) Combustible: Un material combustible es un líquido, sólido o gas que puedan ser oxidados y que en su reacción liberen energía.

Al reaccionar el oxígeno del aire con el material combustible se desprende calor. Elementos como el azufre o carbono se consumen y su consecuencia es generar cenizas o humos. Generalmente se trata de un compuesto orgánico, como: la madera, el carbón vegetal, los plásticos, los hidrocarburos o sus gases, los plásticos, entre otros.

3) Comburente. Se necesita un elemento oxidante de la reacción. Por lo general es que dicho elemento sea el oxígeno del aire, que es donde un incendio se alimenta y puede desarrollarse hasta convertirse en incontrolable. Siempre que exista aire suficiente para que se inicie el flagelo incluso en edificios cerrados con vidrios templados. En edificaciones abiertas o parcialmente abiertas la condición acelera la reacción, ocasionando un incendio sin control.

4) Reacción en cadena. Es la reacción mediante la cual la combustión se mantiene. al iniciarse la combustión el calor se genera, formándose una reacción en cadena que incita que continúe el proceso de liberación de gases por parte del material combustible, los cuales continúan la combustión hasta reducir el material a cenizas incombustibles [12].

El fuego se desarrolla siguiendo una serie de fases comunes en todos los casos:

1) Fase I. el combustible comienza a desprender partículas invisibles al ojo humano según aumenta la temperatura.

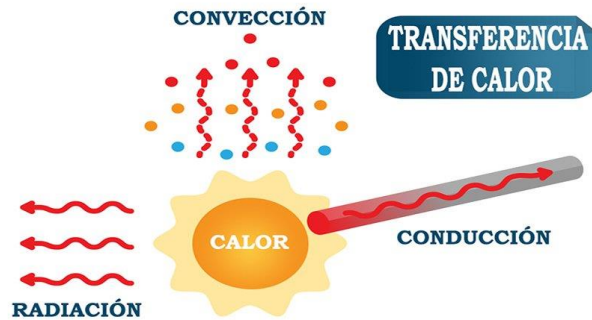
2) Fase II. Se forma humos y vapores que ya son visibles por la concentración de partículas que se desprenden del material.

3) Fase III. En presencia de la cantidad de oxígeno suficiente los vapores se transforman en llamas, con aumento de humos y desprendimiento de calor.

4) Fase IV. Los gases y vapores desprendidos, pueden provocar explosiones en determinadas proporciones [11].

### **Transferencia de calor**

La comprensión del proceso de transferencia del calor (o energía) es clave para estudiar los procesos y el comportamiento de los incendios, por lo que merece un análisis detenido. Pero para estos fines nos bastará estudiar los mecanismos de conducción, convección y radiación [2].

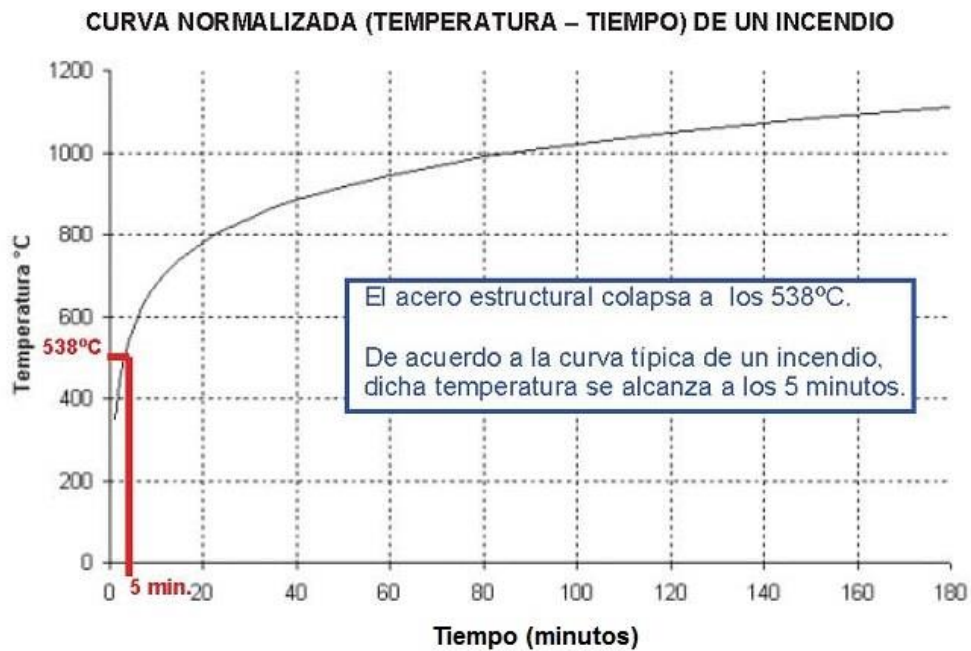


**Figura 4-1. Proceso de transferencia de calor [11].**

Se va a estudiar la influencia que sobre el acero tiene cualquier aumento de la temperatura en su comportamiento estructural y resistente.

Es así que, las propiedades mecánicas del acero NO son las mismas a 20°C (temperatura que se suele considerar de referencia para el diseño de estructuras de acero), que las que pueda tener a 200°C, 400°C ó a 1000°C. De hecho, y según ensayos realizados en base a la Norma NFPA 251 el acero estructural colapsa al alcanzar los 538°C.

La temperatura de 538°C puede ser alcanzada fácilmente en caso de producirse un flagelo que pueda afectar directa o indirectamente a la estructura. Así, y según se muestra en la curva de la figura 2 siguiente, en un incendio tipo esta temperatura se alcanzaría aproximadamente a los 5 minutos de originarse el incendio.

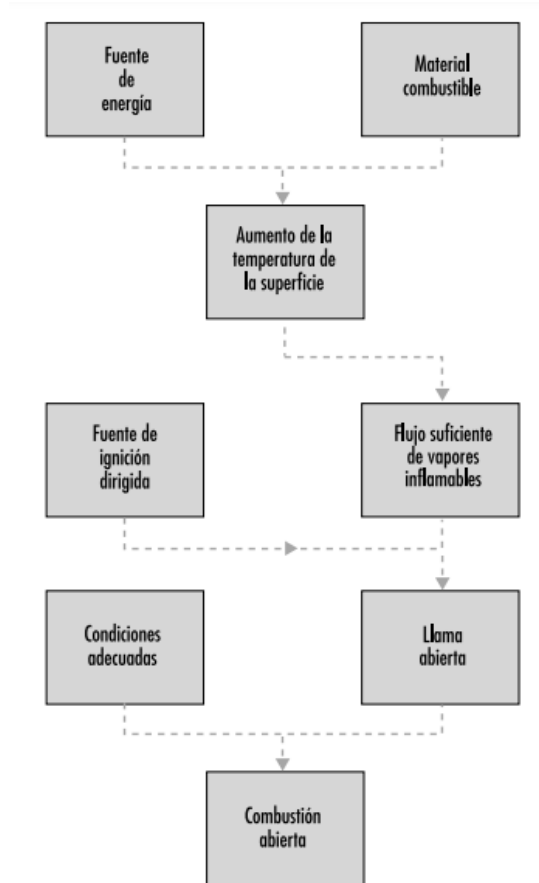


**Figura 4-2. Curva normalizada Temperatura - Tiempo de un incendio [2].**

Sin embargo, antes de producirse la falla estructural, las características mecánicas del acero van variando gradualmente conforme se va produciendo el aumento de la temperatura. En el avance del capítulo se mostrará cómo calcular las propiedades del acero a distintas temperaturas a que esté sometido [1].

### **Fuentes de ignición**

En la Figura 2-3 (Ignición dirigida) se muestra de forma esquemática el proceso de ignición. Para que éste tenga lugar, la fuente de ignición no sólo debe ser capaz de elevar la temperatura de la superficie hasta el punto de ignición o por encima del mismo, sino también de conseguir que los vapores entren en combustión. La aplicación de una llama produce ambas cosas, pero un flujo de radiación desde una fuente remota provoca la aparición de vapores a una temperatura superior al punto de ignición sin que lleguen a arder. Ahora bien, si los vapores formados están suficientemente calientes (lo que supone que la temperatura de superficie sea muy superior al punto de ignición) pueden entrar en ignición de forma espontánea al mezclarse con el aire. Este proceso se denomina ignición espontánea [13].



**Figura 4-3. Representación de una Ignición dirigida [13].**

Existe gran número de fuentes de ignición, que sólo tienen en común el hecho de ser resultado de alguna forma de descuido u omisión. En una lista típica podrían incluirse, por ejemplo, llamas desnudas, “objetos del fumador”, calentamiento por fricción o equipos eléctricos (calentadores, planchas, hornillos, entre otros.) (Véase la Tabla 2-1). Hay que tener en cuenta que los cigarrillos que arden sin llama no pueden provocar directamente una combustión con llama (ni siquiera en los combustibles gaseosos habituales), pero sí una combustión sin llama en materiales propensos a este tipo de combustión, que se carbonizan al calentarlos [14].

**Tabla 4-1. Fuentes de Ignición [11].**

<b>FUENTES DE IGNICIÓN</b>	<b>EJEMPLOS</b>
Equipos eléctricos	Calentadores eléctricos, secadores de pelo, mantas eléctricas, entre otros.

Fuentes de llama abierta	Cerilla, mechero, equipos de soldadura, entre otros.
Equipos con combustible gaseoso	Estufa de gas, calefactor, hornillo, entre otros.
Otros equipos con combustible	Estufa de leña, entre otros.
Material de fumador	Cigarrillo, Pipa, entre otros.
Objetos calientes	Tubos calientes, chispas mecánicas, entre otros.
Exposición al calor	Fuego próximo, entre otros.
Calentamiento espontaneo	Trapos impregnados de aceite de linaza, pila de carbón, entre otros.
Reacción química	Poco frecuente: permanganato, potásico con glicerol.

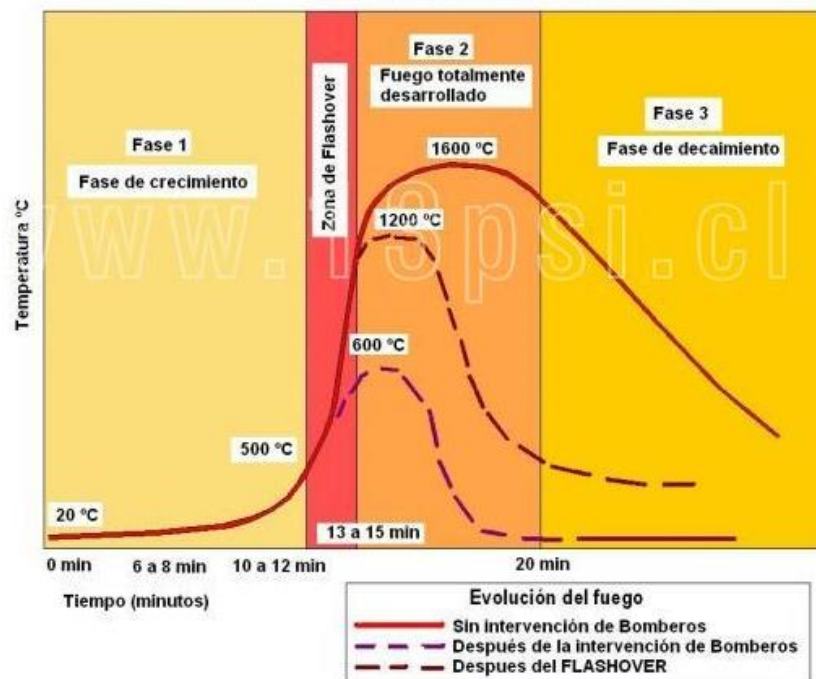
Se oxida la superficie carbonizada en la combustión sin llama, provocando localmente el calor suficiente para producir una nueva carbonización del combustible adyacente aún sin quemar. Se trata de un proceso muy lento que, en algunos casos, puede provocar un incendio que se propagará a gran velocidad y llegar a producir llamas. En los materiales propensos a la combustión sin llama puede darse también un fenómeno de autocalentamiento (Bowes 1984), que se produce cuando se guardan grandes cantidades de material, de forma que el calor generado por la lenta oxidación superficial no puede escapar y da lugar a Puntos de inflamación y de ignición de combustibles sólidos y líquidos [13].

Al inicio de la fase III el crecimiento de un incendio se muestra, y se lo denomina Flashover. “Se trata de la transición de un incendio, de su fase de desarrollo a la fase de incendio totalmente desarrollado, en la cual la liberación de energía térmica es la máxima posible, en función del combustible que se ve implicado en el mismo.” (Como se observa en la figura 4) [11].

Es una combustión que afecta a todos los materiales que se encuentran en el incendio, entrando en combustión de forma súbita y casi simultánea. Este fenómeno se produce en incendios que cuentan con un aporte de oxígeno lo suficiente para propagar.

En cambio, por falta de oxígeno en sitios cerrados se produce una combustión incompleta, todos los elementos se encuentran en el interior, no arden por falta de oxígeno pero, adquieren una temperatura mayor que la de su punto de inflamación. Al

abrir una ventana, una puerta se introduce el aire aportando oxígeno con lo que al instante empiezan a arder todos los materiales de forma violenta. Este fenómeno se lo conoce con el nombre de Backdraft [12].



**Figura 4-4. Fases de evolución del fuego [11].**

El Backdraft es un fenómeno asociado a incendios con deficiencia de ventilación mientras que el Flashover se produce en incendios ventilados.

Un incendio puede llegar a temperaturas que superen los 1000°C. La temperatura que puede llegar a alcanzar un incendio depende del tipo de material combustible, asimismo con el aporte suficiente de comburente y restringir la pérdida de calor del sitio.

El fuego alcanza su punto máximo es decir la temperatura más alta cuando ocurre al flashover y empieza a decaer cuando se ha consumido la mayor parte del material combustible, mientras más material combustible más es el tiempo del flagelo.

Es ahí cuando, la reacción decrece su intensidad, haciéndose más lenta y llega al punto de detenerse por sí sola.

Si un flagelo llega a la fase de flashover, es prácticamente imposible extinguirlo. Se tiene que liberar toda la energía que se produce por el consumo del material combustible, esto suele pasar hasta que no llegue a la fase IV. Durante este tiempo, el cuerpo de bomberos suele enfocarse exclusivamente en evitar que las llamas lleguen a otras zonas próximas que aún no han sido afectadas [11].

### **Resistencia al fuego**

La resistencia al fuego se define por el tiempo que un elemento de construcción es capaz de soportar las condiciones de un incendio. Por ello se mide el tiempo en minutos durante el cual el elemento conserva la estabilidad portante, la estanqueidad de las llamas y no emite gases inflamables.

La evaluación de la resistencia al fuego de cada material se debe realizar en un laboratorio aplicando un incendio normalizado. La resistencia de los materiales se las clasifica de la siguiente manera:

A1: No Combustible. Sin contribución en grado máximo al fuego.

A2: No Combustible. Sin contribución en grado menor al fuego.

B: Combustible. Contribución muy limitada al fuego

C: Combustible. Contribución limitada al fuego

D: Combustible. Contribución media al fuego

E: Combustible. Contribución alta al fuego[4].

### **Formas de propagación**

Existen tres medios por los cuales el fuego se puede propagar a lo largo y ancho de una estructura. Una de ellas es la radiación, que se enfoca en el desplazamiento de ondas de calor generado por fuego que luego se transporta a los elementos próximos. También las ondas de calor pueden ser reflejas, por ejemplo, por planchas metálicas.



Asimismo, influyen también las superficies oscuras, que son capaces de absorber el calor más rápido que las superficies de colores claros.

Los vapores o gases que se generan en un incendio por convección pueden ser trasladados. Esto quiere decir que cuando cualquier gas se calienta, éste se expande y se torna más ligero. Por lo tanto, va a ascender. Cuanto más caliente se encuentre, mayor será su ascensión.

En consecuencia, en los incendios el humo y los gases están a temperaturas tan elevadas, que al subir se van calentando a temperaturas de ignición a los elementos que se encuentran a sus alrededores.

Por último el incendio se puede propagar por conducción, que depende netamente de la conductibilidad del material, que mide que tan rápido puede avanzar el calor a través de los elementos [13].

### **Comportamiento de los materiales**

#### **ACERO ESTRUCTURAL**

Para los efectos de esta tesis, el término “acero estructural” se refiere a los elementos de acero que componen la estructura, indispensable para soportar las cargas de diseño. El acero estructural consiste en los siguientes elementos: armaduras, bases, columnas, conectores de cortante, estructuras de soporte de tuberías, transportadores, largueros, péndolas y colgantes, tornillos de alta resistencia de taller y de campo, vigas y trabes. Los aceros estructurales laminados en caliente, se producen en forma de placas, barras y perfiles de diversas formas [15].

Las normas aprobadas por la ASTM para placas y perfiles laminados en caliente son A36, A529, A572, A242, A588, A709, A514, A852, A913 y A992. La norma A709 es especial, en ella se definen aceros convenientes para la construcción de puentes. [16]

A continuación, se detalla los más comunes en construcción en el Ecuador ASTM A36. Esta norma es aplicable a una gran variedad de perfiles estructurales laminados en

caliente y a placas de la misma calidad que aún están disponibles en el mercado. Tiene un esfuerzo de fluencia de 2 530 kg/cm<sup>2</sup> (250 MPa, 36 ksi) y un esfuerzo mínimo de ruptura en tensión de 4 080 kg/cm<sup>2</sup> a 5 620 kg/cm<sup>2</sup> (400 a 550 MPa, 58 a 80 ksi), como se muestran en la tabla 2-2, tomada de la AISC, y su soldabilidad es adecuada. Con la innovación de este tipo de acero, las conexiones soldadas empezaron a desplazar a las remachadas que pronto desaparecieron [10].

**Tabla 4-2. Propiedades de los aceros según la ASTM [10].**

<b>Applicable ASTM Specifications for Various Structural Shapes</b>															
Steel Type	ASTM Designation	$F_y$ Min. Yield Stress (ksi)	$F_u$ Tensile Stress <sup>a</sup> (ksi)	Applicable Shape Series											
				W	M	S	HP	C	MC	L	HSS		Pipe		
											Rect.	Round			
Carbon	A36	36	58-80 <sup>b</sup>	█	█	█	█	█	█	█	█				
	A53 Gr. B	35	60											█	
	A500	Gr. B	42	58										█	
			46	58										█	
		Gr. C	46	62										█	
			50	62										█	
	A501	36	58										█		
	A529 <sup>c</sup>	Gr. 50	50	65-100	█	█	█	█	█	█	█	█			
		Gr. 55	55	70-100	█	█	█	█	█	█	█	█			

ASTM A529. El ASTM A529 se usa con frecuencia en la construcción de edificios de acero, también es un grado de acero común en perfiles y barras (ángulos, canales de calidad estructural). El acero A529 básico incluye grado 50 para perfiles de los grupos 1 y 2 de la ASTM; placas hasta de una pulgada de grueso y 12 pulgadas de ancho (25x300 mm) y barras hasta de 2 1/2 in (64 mm) de grueso. Los esfuerzos  $F_y$  y  $F_u$  mínimos son 42 y 60-85 ksi (2 950 y 4 220 a 5 975 kg/cm<sup>2</sup>) [15].

### Características mecánicas del acero

Según la norma UNE EN 10020:2001 Se define como el acero o material en el que el hierro es el elemento predominante, el contenido en carbono es, por lo general es inferior al 2% y contiene además a otros elementos.

El límite superior del 2% en el contenido de carbono (C) es el límite que separa al acero de la fundición. Por lo general, el aumento de contenido de carbono en el acero eleva su resistencia a la tracción, pero por lo contrario incrementa su fragilidad en frío y hace que disminuya la tenacidad y la ductilidad. En función de este porcentaje, los aceros se pueden clasificar de la siguiente manera:

- Aceros dulces: Cuando el porcentaje de carbono es del 0,25% máximo. Estos aceros tienen una resistencia última de rotura en el rango de 48-55 kg/mm<sup>2</sup> y una dureza Brinell en el entorno de 135-160 HB. Son aceros que presentan una buena soldabilidad aplicando la técnica adecuada.

- Aceros semidulces: El porcentaje de carbono está en el entorno del 0,35%. Tiene una resistencia última a la rotura de 55-62 kg/mm<sup>2</sup> y una dureza Brinell de 150-170 HB. Estos aceros bajo un tratamiento térmico por templado pueden alcanzar una resistencia mecánica de hasta 80 kg/mm<sup>2</sup> y una dureza de 215-245 HB.

Aplicaciones: Ejes, elementos de maquinaria, piezas resistentes y tenaces, pernos, tornillos, herrajes.

- Aceros semiduro: Si el porcentaje de carbono es del 0,45%. Tienen una resistencia a la rotura de 62-70 kg/mm<sup>2</sup> y una dureza de 280 HB. Después de someterlos a un tratamiento de templado su resistencia mecánica puede aumentar hasta alcanzar los 90 kg/mm<sup>2</sup>.

Aplicaciones: Ejes y elementos de máquinas, piezas bastante resistentes, cilindros de motores de explosión, transmisiones, entre otros.

- Aceros duro: El porcentaje de carbono es del 0,55%. Tienen una resistencia mecánica de 70-75 kg/mm<sup>2</sup>, y una dureza Brinell de 200-220 HB. Bajo un tratamiento de templado estos aceros pueden alcanzar un valor de resistencia de 100 kg/mm<sup>2</sup> y una dureza de 275-300 HB [17].

### **Diagrama Tensión-Deformación**

El diagrama tensión-deformación resulta de la representación gráfica del ensayo de tracción, normalizado en UNE-EN 10002-1, y consiste en someter una probeta de acero normalizada a un esfuerzo ascendente de tracción según su eje hasta la llegada a la rotura de la misma. El ensayo de tracción permite el cálculo de diversas propiedades mecánicas del acero [16]

La probeta de acero empleada en el ensayo consiste en una pieza cilíndrica cuyas dimensiones guardan la siguiente relación de proporcionalidad:

$$L_0 = 5.65 * \sqrt{S_0}$$

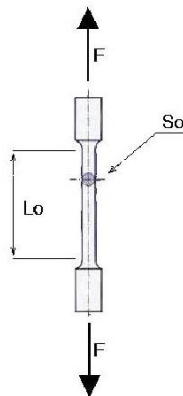
**Ec. 1**

Donde:

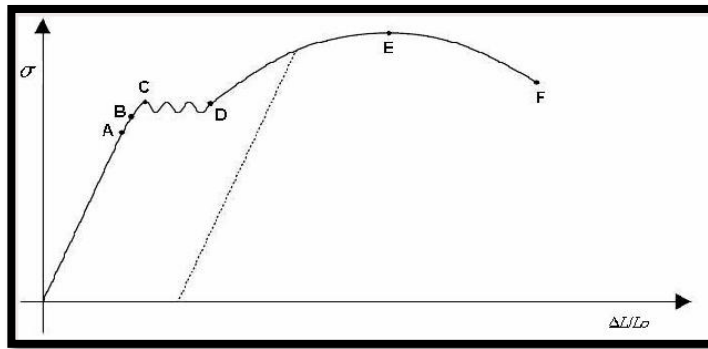
$L_0$  es la longitud inicial

$S_0$  es la sección inicial

$D_0$  es el diámetro inicial de la probeta.



**Figura 4-5. Probeta de ensayo a Tensión [12].**



**Figura 4-6. Grafica esfuerzo – deformación [18].**

El ensayo se da aplicando gradualmente la fuerza de tracción a la probeta, lo cual provoca que el recorrido inicial en la gráfica discorra por la línea recta que une el origen de coordenadas con el punto A.

Hasta llegar al punto A donde tenemos el límite proporcional, se conserva una proporcionalidad entre la tensión alcanzada y el alargamiento unitario producido en la pieza. Es lo que conocemos como la Ley de Hooke, que relaciona linealmente tensiones con deformaciones a través del módulo de elasticidad E, constante para cada material que en el caso de los aceros y fundiciones vale aproximadamente 2.100.000 Kg/cm<sup>2</sup>.

Otra particularidad de este tramo es que al cesar la sollicitación sobre la pieza, ésta recupera su longitud inicial. Es decir, se comporta de manera elástica, y el punto A se denomina Límite de Proporcionalidad.

Pasado el punto A y hasta llegar al punto B, los alargamientos producidos incluso crecen de manera más rápida con la tensión, y se cumple que, al cesar la carga, la pieza recupera de nuevo su geometría inicial, es decir, se sigue comportando elásticamente. El punto B marca el límite a este comportamiento, y por ello al punto B se le denomina Límite Elástico.

Tras pasado el punto B el material pasa a comportarse de manera plástica, es decir, que no recupera su longitud inicial, quedando una deformación remanente al cesar la carga. De esta manera, el proceso de descarga se realiza siguiendo la trayectoria según la

línea punteada mostrada del diagrama tensión-deformación, que como se ve, corta al eje de deformaciones,  $\Delta L/L_0$ , a una cierta distancia del origen, que se corresponde con la deformación remanente que queda. Concretamente, el punto B o Límite Elástico es aquel que le corresponde una deformación remanente del 0.2%.

Si se sigue aplicando carga se llega al punto identificado en la gráfica como C, donde a partir de aquí y hasta el punto D, las deformaciones crecen de manera rápida mientras que la carga fluctúa entre dos valores, llamados límites de fluencia, superior e inferior. Este nuevo estadio, denominado de fluencia, es característico exclusivamente de los aceros dúctiles, no apareciendo en los aceros endurecidos.

Más allá del punto de fluencia D es necesario seguir aplicando un aumento de la carga para conseguir un pronunciado aumento del alargamiento. Entramos ya en la zona de las grandes deformaciones plásticas hasta alcanzar el punto F, donde la carga alcanza su valor máximo, lo que dividida por el área inicial de la probeta proporciona la tensión máxima de rotura o resistencia a la tracción.

A partir del punto E tiene lugar el fenómeno de estricción de la probeta, consistente en una reducción de la sección en la zona de la rotura, y el responsable del periodo de bajada del diagrama, dado que al reducirse el valor de la sección real, el valor de la carga aplicado a partir del punto E también se va reduciendo hasta alcanzar el punto F de rotura [18].

### **Límite elástico y resistencia a la Tracción**

La determinación de las propiedades mecánicas en el acero, como el límite elástico ( $f_y$ ), la resistencia a tracción ( $f_u$ ), así como de otras características mecánicas del acero como el Módulo de Elasticidad ( $E$ ), o el alargamiento máximo que se produce en la rotura, se efectuará mediante el anteriormente definido ensayo de tracción normalizado en la UNE-EN 10002-1.

El valor de la tensión última o resistencia a la tracción se calcula a partir de este ensayo, y se define como el cociente entre la carga máxima que ha provocado el fallo a rotura del material por tracción y la superficie de la sección transversal inicial de la probeta,

mientras que el límite elástico marca el umbral que, una vez se ha superado, el material trabaja bajo un comportamiento plástico y deformaciones remanente [6].

### **Módulo de elasticidad longitudinal o Módulo de Young**

De esta manera se vio que si sobre una probeta cilíndrica de acero de sección transversal A y longitud inicial L0 se le someta a una tracción F que actúa a lo largo de su eje, ésta sufrirá, por efecto de la sollicitación, un alargamiento de magnitud ΔL.

Para los estados iniciales donde la deformación es pequeña,  $\Delta L/L0 \ll 1$ , se obtiene experimentalmente que hasta que la fuerza aplicada F no alcance un rango limitado, éste incremento ΔL de la probeta es proporcional a la fuerza aplicada (F), a su longitud original (L0) e inversamente proporcional al área de su sección transversal (A), es decir que:

$$\Delta L \text{ es proporcional a } \frac{F * L0}{A} \quad \text{Ec. 2}$$

A esta constante de proporcionalidad, o más bien a su inversa, se designan con las letras E, o también con Y, y se les denomina Módulo de Young o Módulo de Elasticidad longitudinal, y es una propiedad intrínseca de cada material.

Sustituyendo en la expresión anterior, ésta quedaría como sigue:

$$\Delta L = \frac{1}{E} \frac{F L0}{A} \quad \text{Ec. 3}$$

Por otro lado, el cociente F/A representa el nivel tensional o la tensión normal de la pieza  $\sigma$ , y el cociente  $\Delta L/L0$  es la deformación unitaria,  $\epsilon$ , con lo que la expresión anterior también puede escribirse de la forma siguiente.

$$\sigma = E \epsilon \quad \text{Ec. 4}$$

Que es la expresión conocida como Ley de Hooke.

El Módulo de Elasticidad o Módulo de Young, para el cálculo y diseño de estructuras de acero en el rango elástico, toma convencionalmente el siguiente valor:  $E= 210.000 \text{ N/mm}^2$  [19].

### **Influencia de la Temperatura en el acero estructural**

Se adjunta la tabla 2-3 siguiente donde se puede consultar la variación de las principales características mecánicas de los aceros estructurales con la temperatura. En concreto en dicha tabla se representan la variación de los siguientes coeficientes con la temperatura a la que se encuentre el acero:

- $K_{y,T} = f_{y,T} / f_y$  : este coeficiente expresa el cociente entre el límite elástico del acero ( $f_{y,T}$ ) para la temperatura (T) que se desee conocer, y el límite elástico del acero a 20°C ( $f_y$ ), valor este último que se puede consultar en cualquier tabla de características del acero.

$$K_{y,T} = f_{y,T} / f_y \quad \text{Ec. 5}$$

- $K_{E,T} = E_T / E$  : este coeficiente expresa el cociente entre el módulo de elasticidad longitudinal del acero o módulo de Young para la temperatura ( $E_T$ ) que se desee conocer, y el módulo de elasticidad del acero a 20°C (E).

$$K_{E,T} = E_T / E \quad \text{Ec. 6}$$

- $K_{p,T} = f_{p,T} / f_y$  : este coeficiente expresa el cociente entre el límite de proporcionalidad ( $f_{p,T}$ ) para la temperatura (T) que se desee conocer, y el límite elástico del acero a 20°C ( $f_y$ ).

$$K_{p,T} = f_{p,T} / f_y \quad \text{Ec. 7}$$



Para otros valores de temperatura (T) que no aparezcan en la tabla siguiente se permite interpolar entre los valores:

**Tabla 4-3. Coeficientes de corrección con la temperatura de las características mecánicas de los aceros estructurales al carbono [18].**

<b>T</b>	<b>K(y,T)=f(y,T)/fy</b>	<b>K(p,T)=f(p,T)/fy</b>	<b>K(E,T)=E(T)/E</b>
20°C	1	1	1
100°C	1	1	1
200°C	1	0.807	0.9
300°C	1	0.613	0.8
400°C	1	0.42	0.7
500°C	0.78	0.36	0.6
600°C	0.47	0.18	0.31
700°C	0.23	0.075	0.13
800°C	0.11	0.05	0.09
900°C	0.06	0.0375	0.0675
1000°C	0.04	0.025	0.045
1100°C	0.02	0.0125	0.0225
1200°C	0	0	0

### **Dureza Brinell**

La dureza es una propiedad que mide la capacidad de resistencia que ofrecen los materiales a procesos de abrasión, desgaste, penetración o de rallado. Para medir la dureza de un material se emplea un tipo de ensayo consistente en calibrar la resistencia de un material a la penetración de un punzón o una cuchilla que se usa como indentador. Este indentador usualmente consta en su extremo, o bien de una esfera, o bien de una pieza en forma de pirámide, o en forma de cono y que está compuesto de

un material mucho más duro que el acero que se está midiendo. La profundidad de la entalla que produce en el acero al ser rallado por este penetrador nos dará una medida de la dureza del material.

Existen varios métodos para calibrar la dureza de un material, siendo el método Brinell y el método Rockwell los más comunes.

El método Brinell (ASTM E10) es un tipo de ensayo utilizado para calcular la dureza de los materiales. Consiste en una esfera de 10 mm de diámetro, usualmente de un acero endurecido, que se presiona contra la superficie del material objeto de estudio bajo una carga estática de 3.000 kg. El tamaño de la huella nos proporcionará una medida de la dureza, denominada dureza Brinell, bajo estas condiciones del ensayo.

Las pruebas de Dureza proporcionan un medio conveniente y no destructivo para estimar las propiedades de resistencia de los materiales. Para realizar esta estimación, el ensayo de Dureza Brinell es muy conocido, debido a que en muchos materiales la relación entre la carga mínima de rotura y el número de dureza Brinell es más o menos lineal. La constante de proporcionalidad varía entre las clases de materiales y también depende de la carga utilizada para determinar la dureza. Existe una dispersión amplia en los datos, pero para aproximaciones gruesas en los aceros, la relación generalmente adaptada es: [20].

$$S_u = 0.5HB \text{ (kpsi)} \quad \text{Ec. 8}$$

$$S_u = 3.4HB \text{ (MPa)} \quad \text{Ec. 9}$$

## **Metalografía**

La metalografía es la ciencia que se encarga del estudio de las características estructurales o constitutivas de un metal en conjunto con las propiedades físicas y mecánicas, revelando la estructura interna mediante una micrografía que proporciona el microscopio óptico configurado a varios niveles de aumento (5x, 10x, 20x, 50x, 100x).

Mediante la aplicación de los distintos procesos podemos obtener una variedad de información cualitativa y cuantitativa relacionado al tamaño de grano, distribución de fases, daños internos y algunas transformaciones que se lo ha dado anteriormente como algún tipo de tratamiento mecánico o térmico [21].

## **Microscopia**

El hierro puro está presente en tres estados, a medida que se incrementa la temperatura desde la temperatura ambiente

Hasta los 911 °C (temperatura crítica AC3), el hierro ordinario cristaliza en el sistema cúbico centrado en el cuerpo y recibe la denominación de hierro  $\alpha$  (alfa) o ferrita. Es un material dúctil y maleable, responsable de la buena forjabilidad de las aleaciones con bajo contenido en carbono y es ferromagnético hasta los 770°C (temperatura de Curie a la que pierde dicha cualidad; se suele llamar también AC2). La ferrita puede disolver pequeñas cantidades de carbono.

Entre 911°C y 1400°C cristaliza en el «sistema cúbico centradas en las caras» y recibe la denominación de hierro  $\gamma$  (gamma) o austenita. Dada su mayor compacidad la austenita se deforma con mayor facilidad y es paramagnética.

Entre 1400°C y 1538°C cristaliza de nuevo en el «sistema cúbico centrado en el cuerpo» y recibe la denominación de hierro  $\delta$  (delta), que es en esencia el mismo hierro alfa pero con un parámetro de red mayor por efecto de la temperatura.

A mayor temperatura, el hierro se encuentra en estado líquido.

Si se añade carbono al hierro, aumenta su grado de ductilidad y sus átomos podrían situarse simplemente en los lugares más pequeños de la red cristalina de este último; sin embargo, en los aceros aparece combinado formando carburo de hierro ( $\text{Fe}_3\text{C}$ ), es decir, un compuesto químico llamado cementita, de modo que los aceros aleados al carbono están formados realmente por ferrita y cementita [22].

## **Recocido total**

Este proceso consiste en calentar las piezas de acero a una temperatura adecuada para luego enfriarlas, el propósito de este proceso puede ser el de refinar el grano, aumentar su tamaño para convertir el área de perlita en granos de austenita, esto únicamente ocurre cuando el enfriamiento es muy lento, mientras que los granos de ferrita no sufrirán ese cambio.

Un cuidadoso estudio microscópico de las proporciones de ferrita y perlita o de perlita y cementita, presentes en un acero recocido, permitirá determinar el contenido de carbono aproximado del acero.

La resistencia aproximada de los aceros recocidos hipoeutectoides puede determinarse por la proporción de ferrita y perlita presentes:

$$\begin{aligned} & \textit{Propiedad aleación} && \textbf{Ec.10} \\ & = \frac{\sum(\% \textit{del componente } i * \textit{la propiedad del componente } i)}{100} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \textit{HB de la aleación} && \textbf{Ec. 11} \\ & = \frac{\% \textit{ferrita}(\textit{HB ferrita}) + \% \textit{perlita}(\textit{HB perlita})}{100} \end{aligned}$$

Donde:

HB ferrita= 90

HB perlita= 200 [23].

## **Esfuerzos permisibles**

Este método de diseño denominado también diseño elástico, consiste en determinar, en primer término, los esfuerzos que se presentan en las secciones críticas de un miembro estructural bajo la acción de las cargas de servicio o de trabajo, considerando un comportamiento elástico del material. Se considera que un miembro está diseñado

correctamente cuando los esfuerzos de trabajo, ocasionados por las cargas de servicio que obran en el miembro no exceden los esfuerzos permisibles. Los esfuerzos permisibles se estipulan en las especificaciones de diseño de acuerdo con el tipo de elemento estructural, tipo de acero y solicitaciones que obran en la estructura. En general, los esfuerzos permisibles se obtienen dividiendo los esfuerzos de falla del material y tipo de solicitación entre un factor de seguridad. En general, los esfuerzos permisibles son una fracción del esfuerzo correspondiente al límite inferior de fluencia (esfuerzo de fluencia,  $F_y$ ), o del esfuerzo mínimo especificado de ruptura en tensión,  $F_u$ , del acero utilizado en el diseño de la estructura o del esfuerzo crítico de un elemento. Ecuación básica de diseño:  $F_{\text{calc.}} \leq F_{\text{perm}}$

Esfuerzos permisibles de miembros en tensión Los esfuerzos permisibles son aplicables a miembros prismáticos sujetos a tensión axial producida por fuerzas que actúan a lo largo de su eje centroidal. Cuando haya excentricidades importantes en las conexiones, sus efectos deben tenerse en cuenta en el diseño del miembro. Cuando se espere que el elemento estructural en estudio vaya a quedar sometido durante su vida útil a un número muy elevado de ciclos de carga, en el cálculo de su resistencia se tendrá en cuenta la posibilidad de una falla por fatiga.

El esfuerzo de tensión permisible,  $F_t$ , no será mayor de  $0.60 F_y$  en el área total

$$F_t = 0.60 F_y \quad \text{Ec. 12}$$

. El esfuerzo de tensión permisible no será mayor de  $0.50 F_u$  en el área neta efectiva.

$$F_t = 0.50 F_u \quad \text{Ec. 13}$$

El esfuerzo permisible en el área neta a tensión del agujero para miembros conectados con pasador es de  $0.45 F_y$  [23].

$$F_t = 0.45 F_y \quad \text{Ec. 14}$$

## **CAPITULO III**

### **MARCO METODOLÓGICO**

#### **3.1 Ubicación**

La investigación necesaria para el estudio sobre el comportamiento de elementos expuestos a fuego se realizará en los laboratorios de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica de la Universidad Técnica de Ambato ubicada en la ciudad de Ambato Campus Huachi Chico.

#### **3.2 Equipos y materiales**

Para la presente investigación se detalla a continuación los materiales y equipos necesarios.

#### **3.3 Material Bibliográfico**

Artículos científicos, Revistas, Papper, publicaciones científicas, en bases de datos.

#### **3.4 Materiales de oficina**

Papel, bolígrafos, textos, fotos.

#### **3.5 Equipos**

Computadora, impresora, cámara, Probetas de aceros al carbono A36 – A572, Máquina de Dureza Brinell, Horno, Termómetro, Metalógrafo

#### **3.6 Tipo de investigación**

#### **DE CAMPO**

La investigación de laboratorio es indispensable en este proyecto en vista que se ensayó las probetas, para la recolección de datos y someterlo a un análisis estadístico que determinó las medidas de tendencia y desviación, y evaluó la fiabilidad de nuestro proyecto.

## **BIBLIOGRÁFICO**

La recolección de información fue muy importante ya que se pudo recurrir a fuentes tales como libros, tesis, internet no solamente para la investigación de las propiedades mecánicas de los elementos sino también para comparar datos y ampliar los conocimientos.

## **EXPERIMENTAL**

La investigación experimental es indispensable en este proyecto puesto que para el desarrollo del trabajo se analizó y evaluó la fiabilidad de nuestro proyecto. Para lo cual se construyó un horno que me ayudó a exponer las muestras a distintas temperaturas que fueron controladas con un pirómetro en distintos tiempos, para después ser ensayadas en el laboratorio, para determinar sus características mecánicas en las muestras.

## **EXPLORATORIA**

Con el presente proyecto se trató de solucionar un problema que se presenta en la actualidad en el sector de la ingeniería de estructuras, un problema que no se puede predecir su eventualidad, pero que debe ser considerado debido a que los incendios de las estructuras generan incluso pérdida de vidas humanas, es indispensable tener datos para saber que se debe hacer frente a este suceso.

## **DESCRIPTIVO**

Se puede decir que el proyecto cumplió con las necesidades que este sector requiere en especial para las futuras construcciones de estructuras metálicas.

Los conocimientos que se debieron tener para el desarrollo y la aplicación de este proyecto de investigación fueron amplios, ya que se necesitó de asignaturas implicadas, pero en especial ingeniería de materiales, estructuras, metalurgia y estadística

### **3.7 Prueba de Hipótesis - pregunta científica – idea a defender**

Las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de acero dependen del tiempo y temperatura de exposición a un incendio.

#### **Población o muestra:**

La población sobre la cual se desarrolló la investigación fue en si todas las estructuras de acero, que a diario están expuestas a sufrir un incendio.

La muestra fue de 27 probetas de un acero A36 que es un acero comercial en Ecuador.

#### **Recolección de información**

En la presente investigación se utilizó la observación directa de las muestras, con el fin de tomar datos verídicos de los ensayos, se recolectó la información necesaria para poder determinar resultados reales, a continuación, se describe el enumera los pasos seguidos en los ensayos realizados.

#### *Metalografía*

Obtención de la muestra

Encapsular

Desbastar

Pulir

Ataque químico

Observación microscópica



Resultados: identificación de los elementos metalográficos

*Dureza Brinell*

Obtención de la muestra

Desbastar

Pulir

Aplicar una carga de 3000 kg a una esfera de 10mm

Medir el diámetro de la huella de impresión

Resultados: Determinar la Dureza Brinell en el catálogo del fabricante, en función del diámetro de la huella.

### **3.8 Demostración de la hipótesis**

Para determinar la prueba de Hipótesis se analizaron los resultados obtenidos versus los esperados según datos tomados del estudio de Sajid and Kiran “Post-fire Mechanical Behavior of ASTM A572 Steels Subjected to High Stress Triaxialities”[10] los mismos que se presentan en la siguiente tabla.

**Tabla 9-1. Resistencia obtenida versus Resistencia esperada**

Temperatura	Sut esperado	Sut calculado	di	(di-d med)^2
600	72,4	55,6	16,800	24,010
800	88,9	63,2	25,700	16,000
1000	86,9	64,3	22,600	0,810

Suponiendo que las diferencias tienen distribución normal de probabilidad, la prueba de hipótesis es como sigue.

$$H_0: \mu_D > 0$$

$$H_a: \mu_D < 0$$

En otras palabras, si se aprueba la hipótesis nula querrá decir que existe suficiente evidencia para establecer que la diferencia entre los datos obtenidos en los ensayos tiene mucha diferencia con los esperados, por lo tanto, no se los podrá utilizar en construcción.

En donde  $\mu_1 - \mu_2 = \mu_D$

Para una probabilidad del 95 % se tiene un nivel de significancia  $\alpha$  de 0.05, por tratarse de muestras relacionadas y pequeñas menores de 30, el estadístico de prueba se toma de la siguiente tabla.

**Tabla 9-2. Probabilidad de la Normal Estándar**

$Z_\alpha$	0.00	0.01	0.02	0.03	0.04	0.05	0.06	0.07	0.08	0.09
0.0	0.5000	0.4960	0.4920	0.4880	0.4840	0.4801	0.4761	0.4721	0.4681	0.4641
0.1	0.4602	0.4562	0.4522	0.4483	0.4443	0.4404	0.4364	0.4325	0.4286	0.4247
0.2	0.4207	0.4168	0.4129	0.4090	0.4052	0.4013	0.3974	0.3936	0.3897	0.3859
0.3	0.3821	0.3783	0.3745	0.3707	0.3669	0.3632	0.3594	0.3557	0.3520	0.3483
0.4	0.3446	0.3409	0.3372	0.3336	0.3300	0.3264	0.3238	0.3192	0.3156	0.3121
0.5	0.3085	0.3050	0.3015	0.2981	0.2946	0.2912	0.2877	0.2843	0.2810	0.2776
0.6	0.2743	0.2709	0.2676	0.2643	0.2611	0.2578	0.2546	0.2514	0.2483	0.2451
0.7	0.2420	0.2389	0.2358	0.2327	0.2296	0.2266	0.2236	0.2206	0.2177	0.2148
0.8	0.2119	0.2090	0.2061	0.2033	0.2005	0.1977	0.1949	0.1922	0.1894	0.1867
0.9	0.1841	0.1814	0.1788	0.1762	0.1736	0.1711	0.1685	0.1660	0.1635	0.1611
1.0	0.1587	0.1562	0.1539	0.1515	0.1492	0.1469	0.1446	0.1423	0.1401	0.1379
1.1	0.1357	0.1335	0.1314	0.1292	0.1271	0.1251	0.1230	0.1210	0.1190	0.1170
1.2	0.1151	0.1131	0.1112	0.1093	0.1075	0.1056	0.1038	0.1020	0.1003	0.0985
1.3	0.0968	0.0951	0.0934	0.0918	0.0901	0.0885	0.0869	0.0853	0.0838	0.0823
1.4	0.0808	0.0793	0.0778	0.0764	0.0749	0.0735	0.0721	0.0708	0.0694	0.0681
1.5	0.0668	0.0655	0.0643	0.0630	0.0618	0.0606	0.0594	0.0582	0.0571	0.0559
1.6	0.0548	0.0537	0.0526	0.0516	0.0505	0.0495	0.0485	0.0475	0.0465	0.0455
1.7	0.0446	0.0436	0.0427	0.0418	0.0409	0.0401	0.0392	0.0384	0.0375	0.0367
1.8	0.0359	0.0351	0.0344	0.0336	0.0329	0.0322	0.0314	0.0307	0.0301	0.0294
1.9	0.0287	0.0281	0.0274	0.0268	0.0262	0.0256	0.0250	0.0244	0.0239	0.0233
2.0	0.0228	0.0222	0.0217	0.0212	0.0207	0.0202	0.0197	0.0192	0.0188	0.0183
2.1	0.0179	0.0174	0.0170	0.0166	0.0162	0.0158	0.0154	0.0150	0.0146	0.0143
2.2	0.0139	0.0136	0.0132	0.0129	0.0125	0.0122	0.0118	0.0116	0.0113	0.0110

$t=1,64$

Para el cálculo del estadístico T, en primer lugar, se calcula el promedio de las diferencias muestrales.

$$\bar{d} = \frac{\sum d_i}{n} \quad \text{Ec. 15}$$

Luego la cuasi varianza es:

$$S_d^2 = \frac{\sum (d_i - \bar{d})^2}{n - 1} \quad \text{Ec. 16}$$

La desviacion estandar muestral de las diferencias muestrales es Sd.

Y por último el estadístico es:

$$T = \frac{\bar{d}}{S_d/\sqrt{n}} \quad \text{Ec. 17}$$

Los valores se encuentran en la siguiente tabla.

**Tabla 9-3. Datos de Chi Cuadrado**

Temperatura	Sut esperado	Sut calculado	di	(di-d med)^2
600	72,4	55,6	16,800	24,010
800	88,9	63,2	25,700	16,000
1000	86,9	64,3	22,600	0,810
Datos n	3			
d media	21,700			
Sd^2	20,410			
Sd	4,517742799			
T	8,319531278			

**Fuente:** Autor

Como  $T > t$ , es decir  $8,319 > 1,64$ , se rechaza la hipótesis nula, por lo tanto para un nivel de significancia del 0.05 no existen datos suficientes para decir que las diferencias son significativa.

### **Variables respuesta o resultados alcanzados**

En el presente trabajo investigativo se caracterizó diferentes elementos estructurales tales como columnas, vigas y correas de acero ASTM A 36 expuestos a flagelos, considerando diferentes tiempos y temperaturas de exposición; Para la parte experimental se simuló las condiciones mediante la utilización de un horno convencional en el que se colocó varias muestras de acero y material combustible tratando de simular un flagelo real, luego de lo cual se tomaron muestras a temperaturas de 600 C, 800 C y 1200 C y tiempos de exposición de 30, 45 y 60 minutos, a las que se realizaron ensayos de dureza y microscopia en el laboratorio de materiales de la Facultad de Ingeniería Civil y Mecánica y poder determinar las propiedades mecánicas del material sometidos bajo estas condiciones y compararlas con las del material no expuesto; mediante la dureza se pudo determinar la resistencia última del material y a partir de los porcentajes de Ferrita y Perlita también se verificó que la resistencia última a la tracción aumentó en un 9-10 % ya que las muestras fueron enfriadas mediante chorro de agua fría, condición que se da cuando se apaga un incendio; si bien es cierto que las propiedades mecánicas de las probetas no varió significativamente, de la revisión bibliográfica se pudo determinar que en tiempo real del flagelo, la resistencia a la fluencia disminuye en proporción inversa con la temperatura por lo que es posible que la estructura colapse en ese momento, de lo anteriormente mencionado se puede decir también que si la estructura no colapsa durante el incendio y sigue en pie y sin deformaciones en la estructura, la misma puede seguir prestando servicio; Por ultimo después del análisis se pudo concluir que las propiedades mecánicas de los elementos estructurales de acero en el momento del incendio dependen del tiempo y temperatura de exposición del mismo.

## CAPITULO IV

### RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Para el presente capítulo, se cuenta con datos reales obtenidos de 27 probetas de elementos estructurales de acero ASTM A36, expuestas a diferentes tiempos y temperaturas simulando un incendio real en un horno convencional, las cuales fueron ensayadas en laboratorio mediante ensayo de Dureza Brinell y Metalográficos.

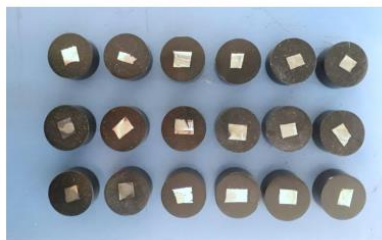
**Tabla 14-1. Resultados de ensayo de Dureza Brinell.**

CTT - 2021			
UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO			
FACULATAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA			
CENTRO DE TRANSFERENCIA DE TECNOLOGIAS			
ENSAYO DE DUREZA			
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Norma:</b>	INEN123: Ensayo de Dureza Brinell
<b>Identificación del componente de Estudio:</b>	Acero estructural A36		
<b>Solicitado por:</b>	Fernanda Guamanquispe	<b>Fecha:</b>	29/12/2021
<b>Centro de Estudio y Análisis:</b>	Laboratorio de Metalografía - FICM		
PARAMETROS			
<b>Equipo:</b>	Lyrics: Rockwell, hardness tester	Brinell, Vickers	<b>Modelo:</b> HBRV-187.5
<b>Temperatura Ambiente:</b>	<b>Dureza:</b>	<b>Iluminación:</b>	<b>Orden</b>

<b>16.0°C</b>	<b>BRINELL</b>	<b>Luz Natural</b>	<b>CTT-2021</b>
	Identador: 2.5mm		
	Carga: 187.5 kgf		



PROBETAS A ENSAYAR:



**RESULTADOS:**

<b>PROBETA</b>	<b>Diámetro medio (mm)</b>	<b>Diámetro indentación (mm)</b>	<b>de Dureza HBW</b>
<b>V600-1</b>	3.22	1.288	134
<b>V600-2</b>	2.95	1.18	161
<b>V600-3</b>	3.75	1.5	95.5
<b>C800-1</b>	3.35	1.34	123
<b>C800-2</b>	3.38	1.352	120
<b>C800-3</b>	3.5	1.4	111
<b>V800-1</b>	3.18	1.272	137
<b>V800-2</b>	3.6	1.44	105
<b>V800-3</b>	3.12	1.248	123
<b>C1000-1</b>	3.58	1.432	106
<b>C1000-2</b>	3.52	1.408	110
<b>C1000-3</b>	3.25	1.3	111
<b>V1000-1</b>	3.1	1.24	125
<b>V1000-2</b>	3.43	1.372	116
<b>V1000-3</b>	3.14	1.256	121
<b>K1000-1</b>	3.55	1.42	108
<b>K1000-2</b>	3.75	1.5	95.5

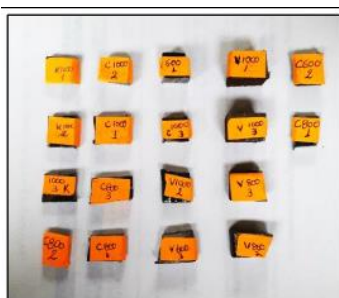
<b>K1000-3</b>	3.41	1.364	118
----------------	------	-------	-----

**Fuente:** Autor

Se tomó tres muestras de cada elemento con diferentes tiempos y temperaturas de exposición al fuego, los cuales fueron ensayados aplicados una fuerza de 187.5kgf y un indentador de 2.5mm por 10 segundos dando resultados de Dureza mostrados en la tabla 4-1. El informe del ensayo se puede ver en Anexos.

**Tabla 14-2. Resultados de ensayo de Metalografía.**

<b>CTT - 2021</b>			
<b>UNIVERSIDAD TECNICA DE AMBATO</b>			
<b>FACULTAD DE INGENIERIA CIVIL Y MECANICA</b>			
<b>CENTRO DE TRANSFERENCIA DE TECNOLOGIAS</b>			
<b>ENSAYO DE METALOGRAFIA</b>			
<b>Tipo de estudio:</b>	De laboratorio	<b>Orden No:</b>	CTT2021
<b>Identificación del componente de Estudio:</b>	Acero estructural A36		
<b>Solicitado por:</b>	Fernanda Guamanquispe	<b>Fecha:</b>	29/12/2021
<b>Centro de Estudio y Análisis:</b>	Laboratorio de Metalografía - FICM		
<b>PARAMETROS</b>			
<b>Equipo:</b>	Microscopio Metalográfico	<b>Modelo:</b>	RMM-1
<b>Temperatura Ambiente:</b>	<b>Magnificación</b>	<b>Filtro</b>	<b>Iluminación</b>
17.0°C	50-500x	4 colores	Luz fluorescente



### PARAMETROS DEL ENSAYO METALOGRAFICO

Acondicionamiento de la superficie:		Pulido Mecánico	
Temperatura durante el pulido:	16.0°C	Superficie preparada en:	Lijas: 240,320,400,600,1500
Ataque durante el pulido:	Nital 4	Tiempo:	3 segundos
Elemento T	Tiempo	% Ferrita	% Perlita
<b>V 600</b>	30 minutos	74.2	25.8
	45 minutos	82.3	17.7
	60 minutos	85.7	14.3
<b>C800</b>	30 minutos	76.2	23.8
	45 minutos	69.4	30.6
	60 minutos	70.3	29.7
<b>V800</b>	30 minutos	54.6	45.4
	45 minutos	62.2	37.8
	60 minutos	68.3	31.7
<b>C1000</b>	30 minutos	53.9	46.1
	45 minutos	49.9	50.1
	60 minutos	74.7	25.3
<b>V1000</b>	30 minutos	66.6	33.4
	45 minutos	65.6	34.4
	60 minutos	66.1	33.9
<b>K1000</b>	30 minutos	74.9	25.1



---

45 minutos	70.3	29.7
60 minutos	62.2	37.8

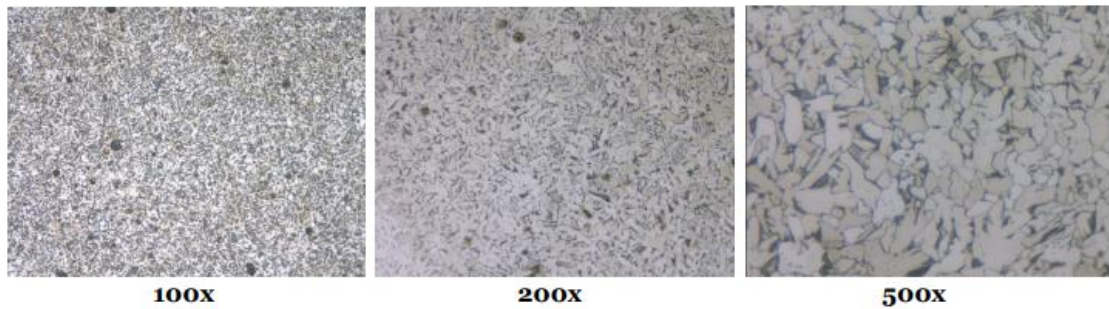
---

**Fuente:** Autor

En el estudio metalográfico realizado se puede ver que mientras más tiempo de exposición tiene un elemento y se lo expone a mayor temperatura, el porcentaje de perlita va disminuyendo mientras que el de ferrita va aumentando en sus fases. A pesar de alcanzar temperaturas de 1000 grados centígrados en ningún caso llegamos a la fase de martensita.

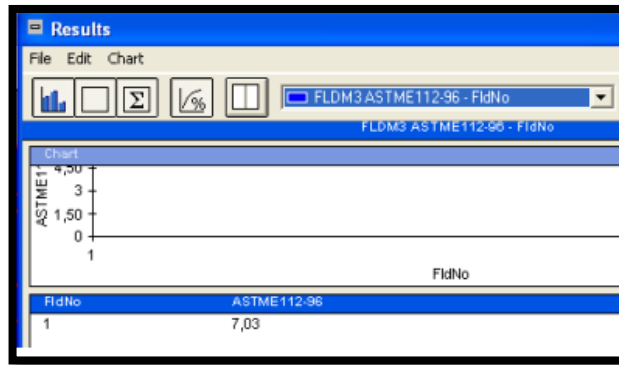
### **Resultados metalográficos por probetas**

#### **Probeta a 600 °C durante 30 minutos**



**Figura 14-1. Probeta V600-1 a distintos aumentos.**

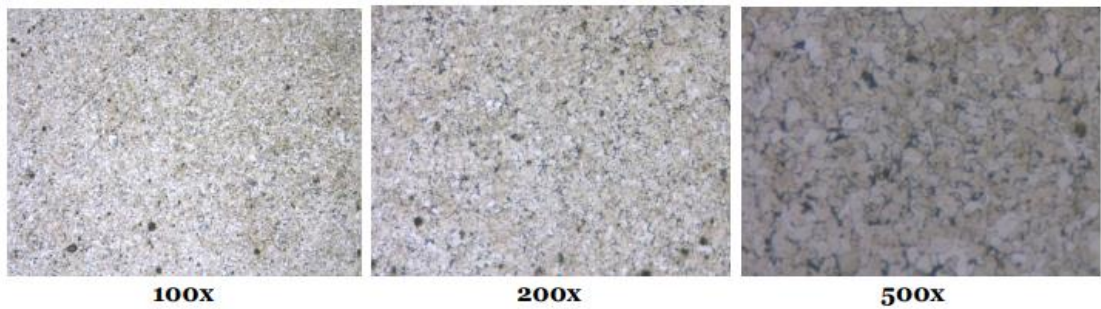
**Fuente:** Autor



**Figura 14-2. Tamaño de grano 7.03 um**

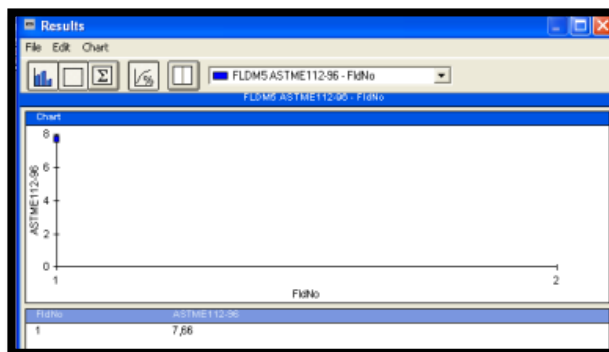
**Fuente:** Autor

**Probeta a 600 °C durante 45 minutos**



**Figura 14-3. Probeta V600-2 a distintos aumentos.**

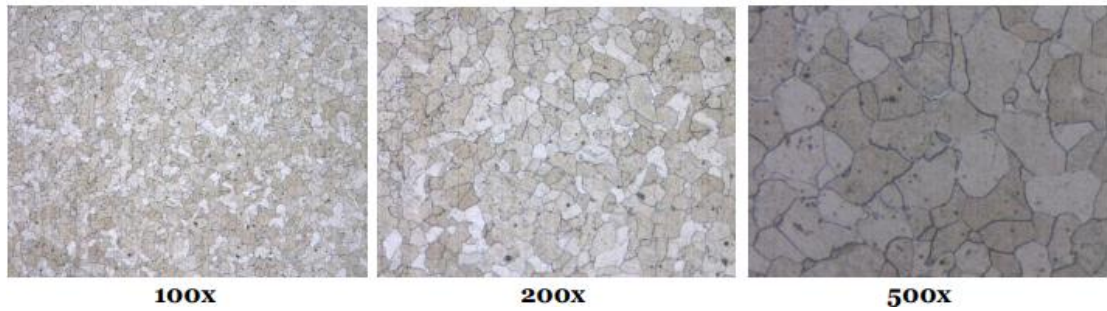
**Fuente:** Autor



**Figura 14-4. Tamaño de grano 7.66 um**

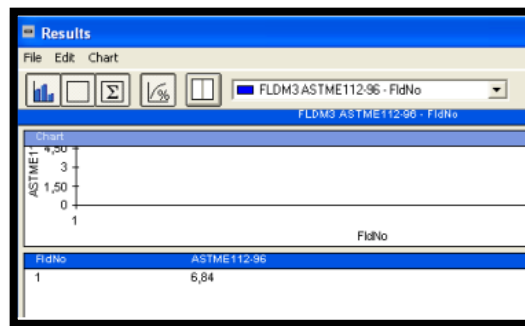
**Fuente:** Autor

**Probeta a 600 °C durante 60 minutos**



**Figura 14-5. Probeta V600-3 a distintos aumentos.**

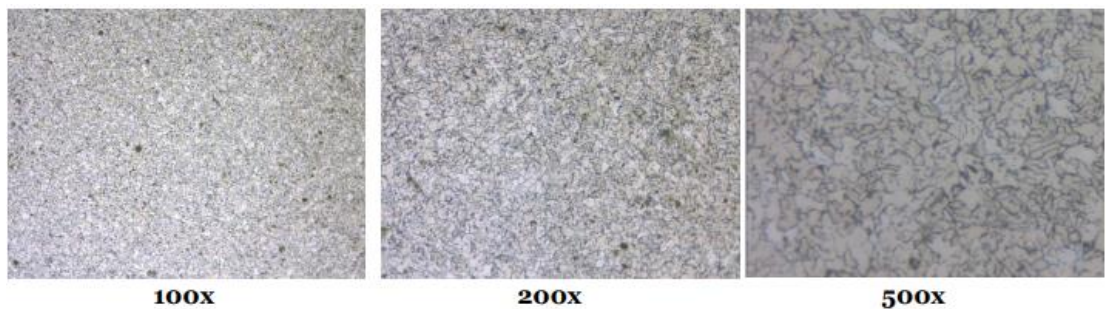
**Fuente: Autor**



**Figura 14-6. Tamaño de grano 6.84 um**

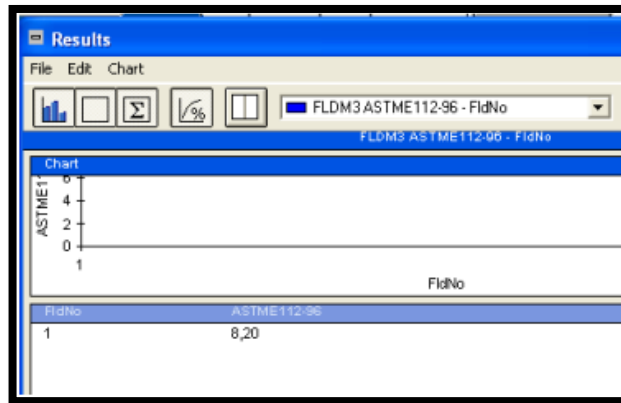
**Fuente: Autor**

**Probeta a 800 °C durante 30 minutos**



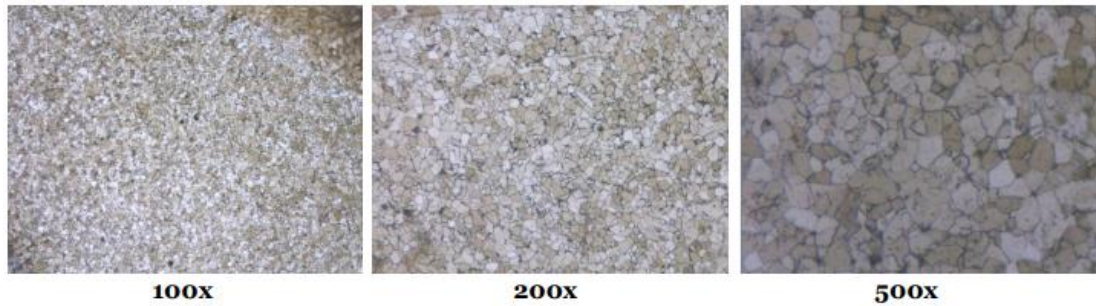
**Figura 14-7. Probeta C800-1 a distintos aumentos.**

**Fuente: Autor**



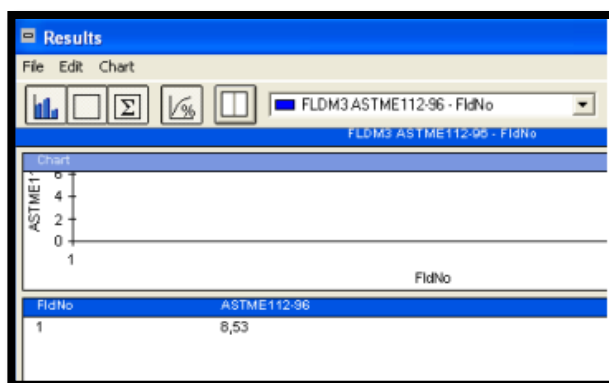
**Figura 14-8. Tamaño de grano 8.20 um**

**Fuente: Autor**



**Figura 14-9. Probeta V800-1 a distintos aumentos.**

**Fuente: Autor**



**Figura 14-10. Tamaño de grano 8.53 um**

**Fuente: Autor**

Probeta a 800 °C durante 45 minutos

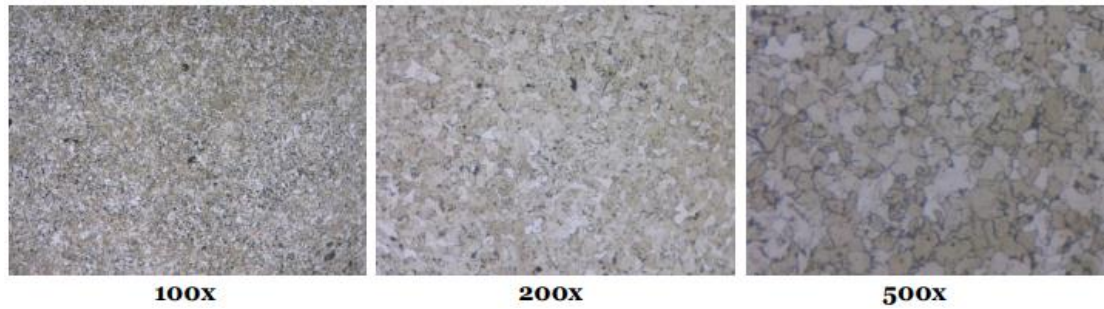


Figura 14-11. Probeta C800-2 a distintos aumentos.

Fuente: Autor

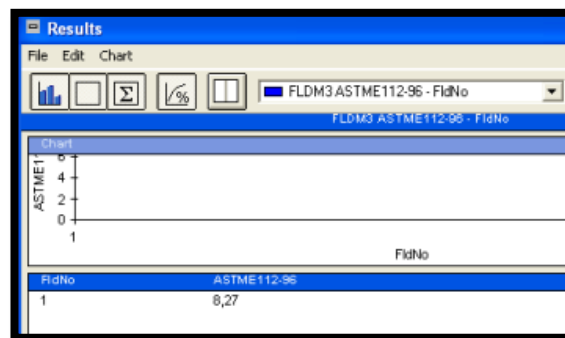


Figura 14-12. Tamaño de grano 8.27 um

Fuente: Autor

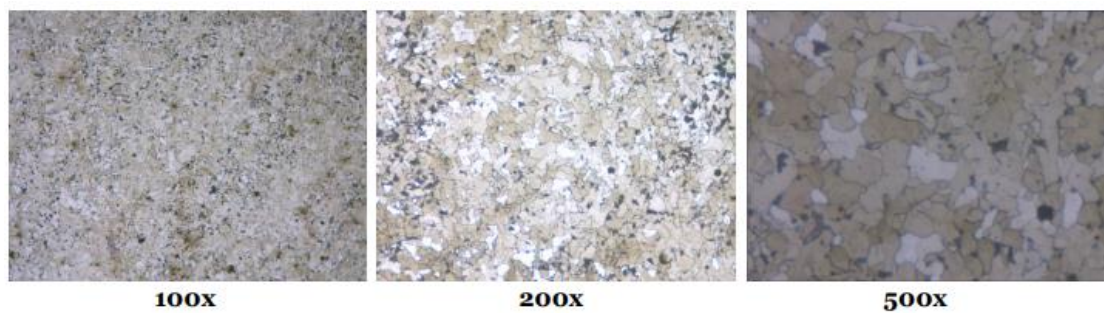
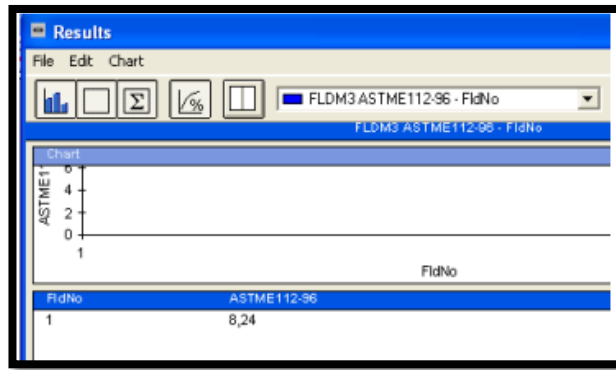


Figura 14-13. Probeta V800-2 a distintos aumentos.

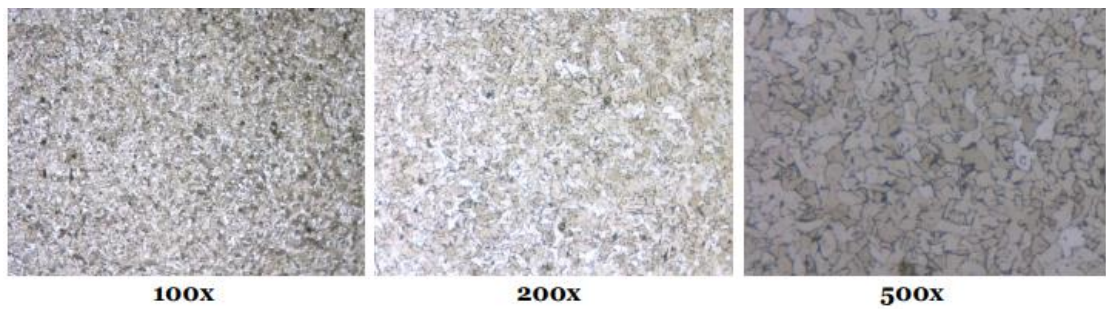
Fuente: Autor



**Figura 14-14. Tamaño de grano 8.24 um**

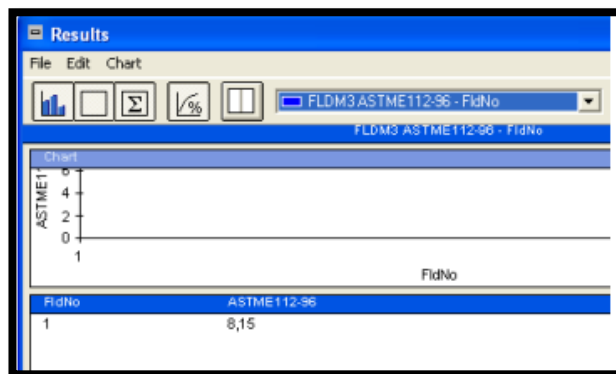
**Fuente: Autor**

**Probeta a 800 °C durante 60 minutos**



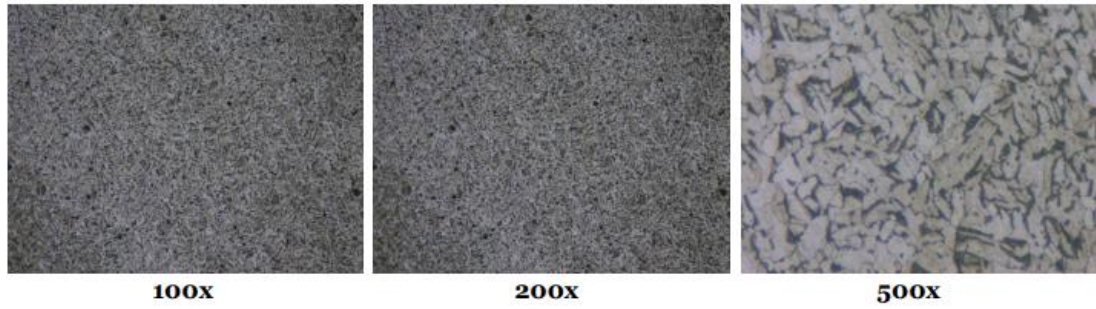
**Figura 14-15. Probeta C800-3 a distintos aumentos.**

**Fuente: Autor**



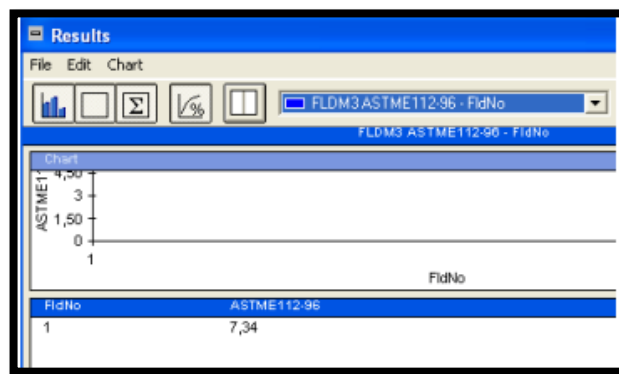
**Figura 14-16. Tamaño de grano 8.15 um**

**Fuente: Autor**



**Figura 14-17. Probeta V800-3 a distintos aumentos.**

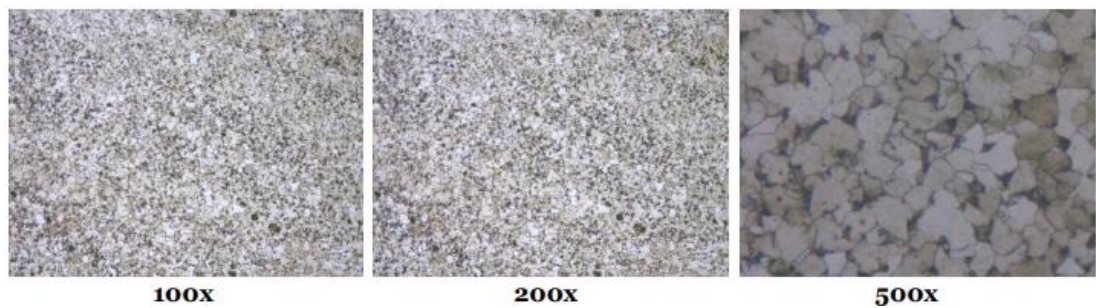
**Fuente:** Autor



**Figura 14-18. Tamaño de grano 7.34 um**

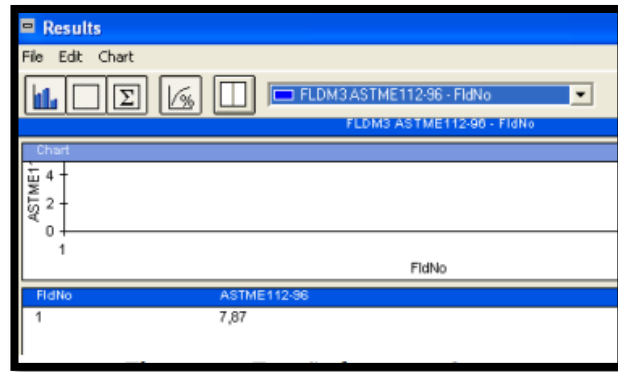
**Fuente:** Autor

**Probeta a 1000 °C durante 30 minutos**



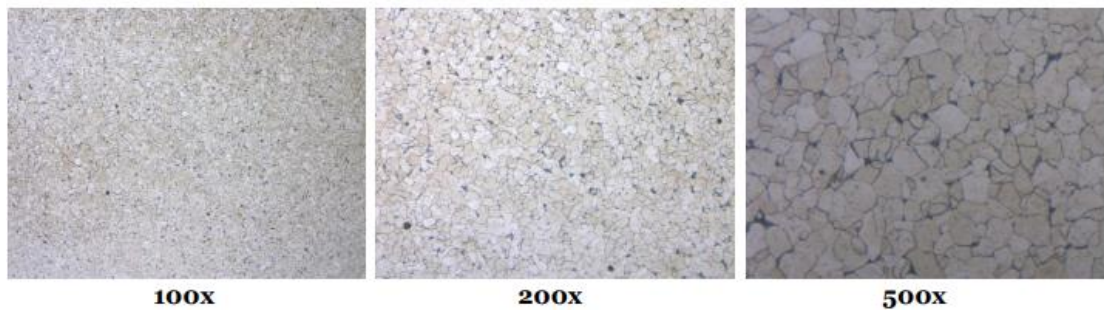
**Figura 14-19. Probeta C1000-1 a distintos aumentos.**

**Fuente:** Autor



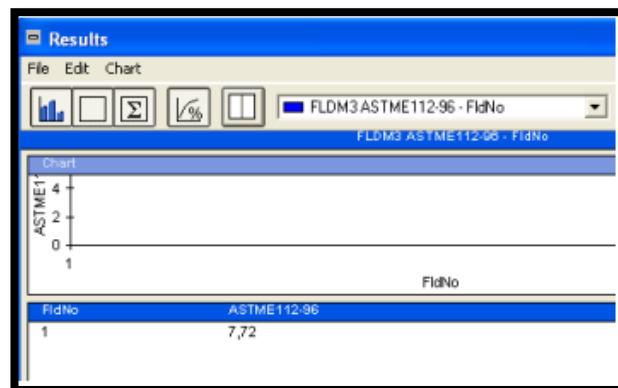
**Figura 14-20. Tamaño de grano 7.67 um**

**Fuente: Autor**



**Figura 14-21. Probeta K1000-1 a distintos aumentos.**

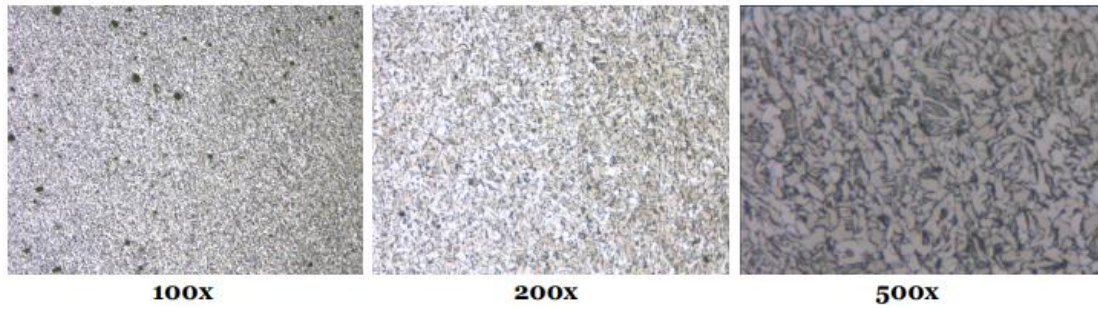
**Fuente: Autor**



**Figura 14-22. Tamaño de grano 7.72 um**

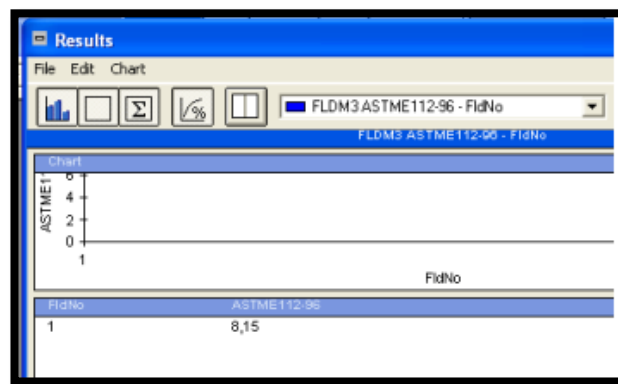
**Fuente: Autor**





**Figura 14-23. Probeta V1000-1 a distintos aumentos.**

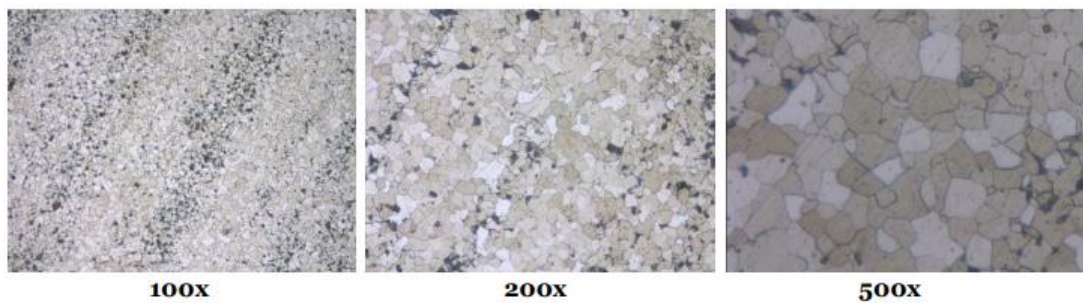
**Fuente: Autor**



**Figura 14-24. Tamaño de grano 8.15 um**

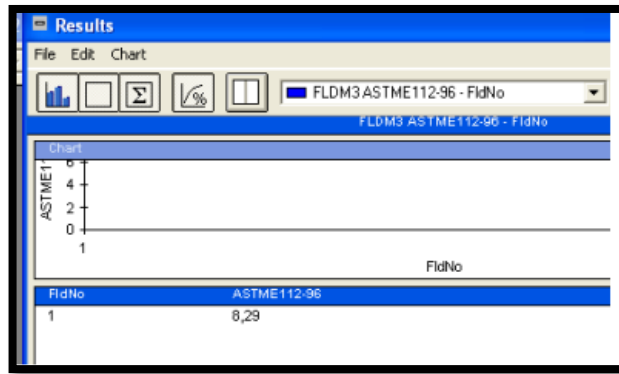
**Fuente: Autor**

**Probeta a 1000 °C durante 45 minutos**



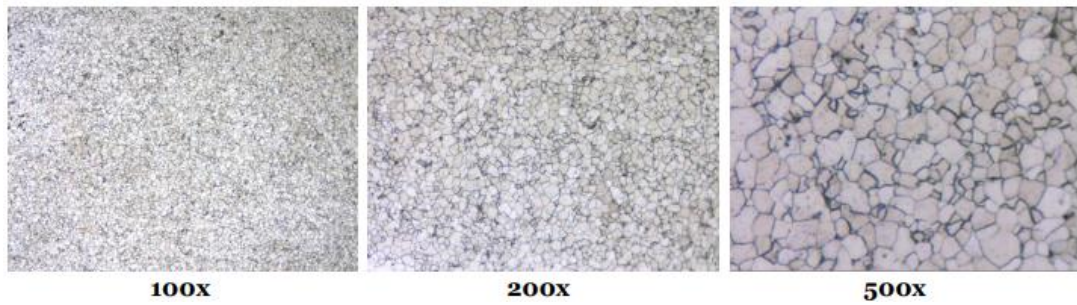
**Figura 14-25. Probeta C1000-2 a distintos aumentos.**

**Fuente: Autor**



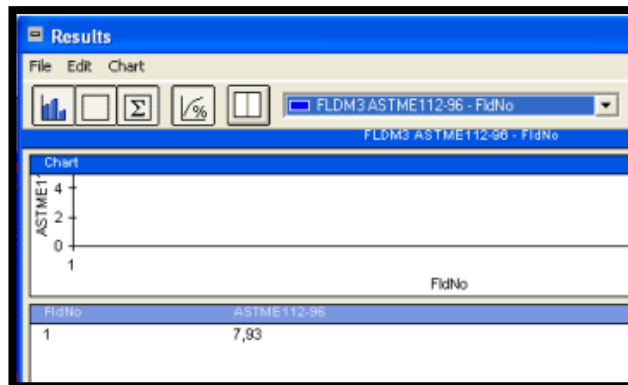
**Figura 14-26. Tamaño de grano 8.29 um**

**Fuente: Autor**



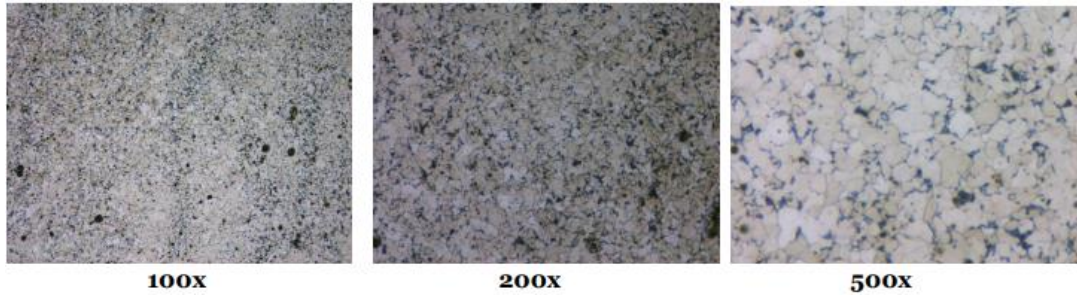
**Figura 14-27. Probeta K1000-2 a distintos aumentos.**

**Fuente: Autor**



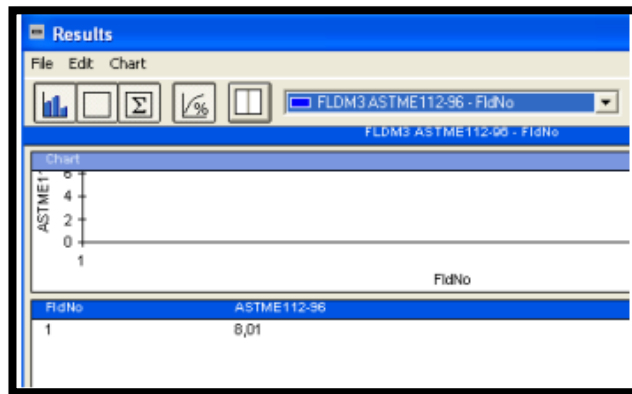
**Figura 14-28. Tamaño de grano 7.93 um**

**Fuente: Autor**



**Figura 14-29. Probeta V1000-2 a distintos aumentos.**

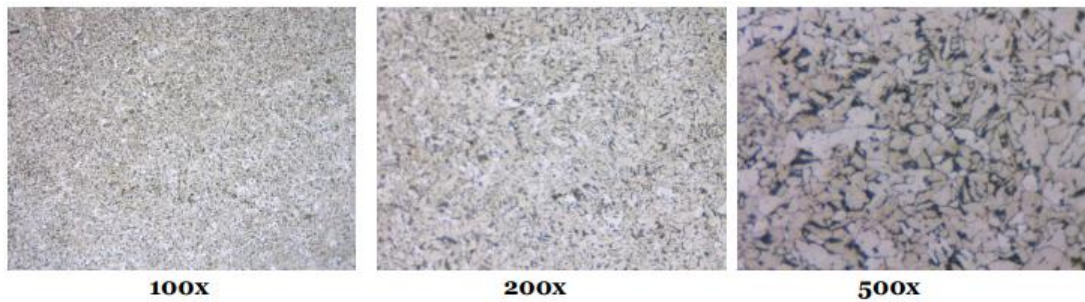
**Fuente:** Autor



**Figura 14-30. Tamaño de grano 8.01 um**

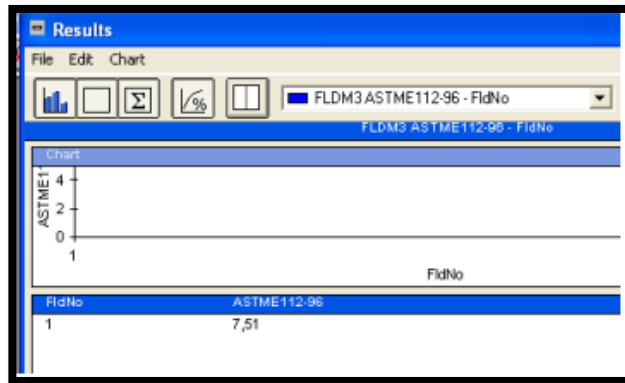
**Fuente:** Autor

**Probeta a 1000 °C durante 60 minutos**



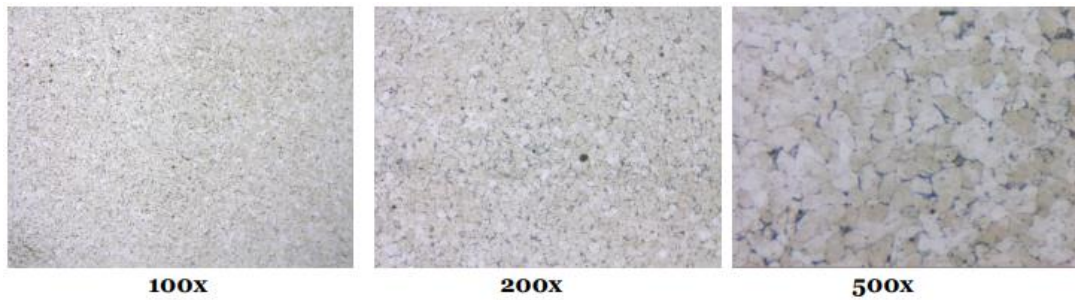
**Figura 14-31. Probeta C1000-3 a distintos aumentos.**

**Fuente:** Autor



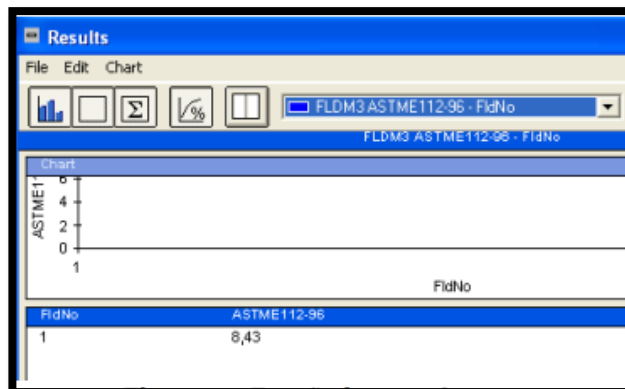
**Figura 14-32. Tamaño de grano 7.51 um**

**Fuente: Autor**



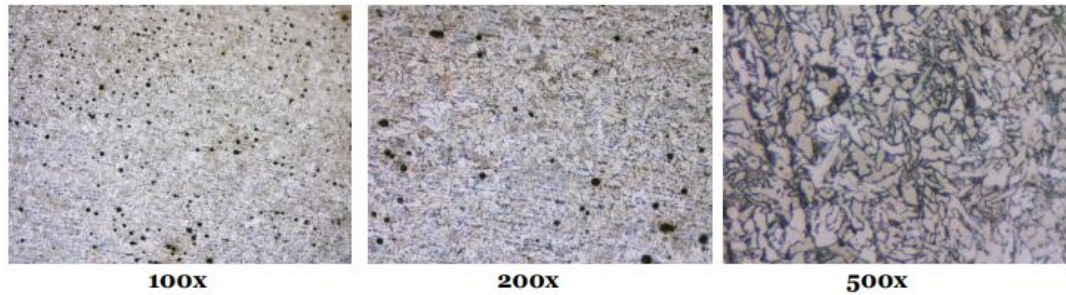
**Figura 14-33. Probeta K1000-3 a distintos aumentos.**

**Fuente: Autor**



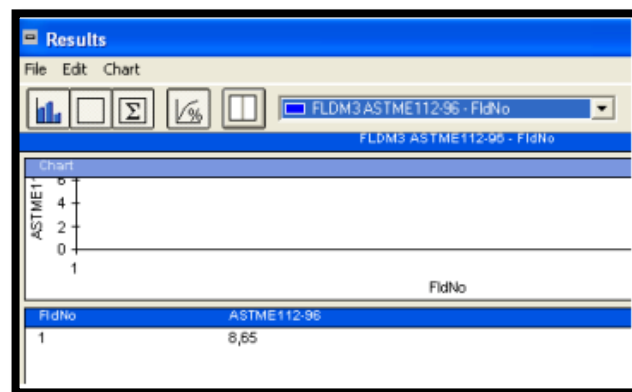
**Figura 14-34. Tamaño de grano 8.43 um**

**Fuente: Autor**



**Figura 14-35. Probeta V1000-3 a distintos aumentos.**

**Fuente:** Autor



**Figura 14-36. Tamaño de grano 8.55 um**

**Fuente:** Autor

En las Microestructuras de los ensayos realizados de metalografía se puede visualizar como la Ferrita va tomando formas alargadas e irregulares, mientras mayor es el tiempo de exposición de las probetas el tamaño de grano va aumentando.

### **Determinación de la resistencia del acero**

Con los porcentajes de Ferrita y Perlita determinados en los ensayos de laboratorio se puede determinar la resistencia del acero expuesto a diferentes tiempos y temperaturas, mediante la Ec.11, determinaremos la Dureza HB de la aleación para después determinar mediante la Ec. 8, la resistencia del material.

*HB de la aleación*

$$= \frac{\%ferrita(HB\ ferrita) + \%perlita(HB\ perlita)}{100}$$

**Ec. 18**

Donde:

$$HB\ ferrita = 90$$

$$HB\ perlita = 200$$

El porcentaje de ferrita y perlita lo tomaremos de la tabla 4-2 de los ensayos de metalografía.

$$HB\ V\ 600 = \frac{\%ferrita(HB\ ferrita) + \%perlita(HB\ perlita)}{100}$$

$$HB\ V\ 600 = \frac{74.2(90) + 25.8(200)}{100}$$

$$HB\ V\ 600 = \frac{11838}{100}$$

$$HB\ V\ 600 = 118.38$$

**Tabla 14-3. Dureza de la aleación ferrita + perlita**

Elemento T	Tiempo	% Ferrita	% Perlita	HB de aleación
V 600	30 minutos	74.2	25.8	118.38
	45 minutos	82.3	17.7	109.47
	60 minutos	85.7	14.3	105.73

<b>C800</b>	30 minutos	76.2	23.8	116.18
	45 minutos	69.4	30.6	123.66
	60 minutos	70.3	29.7	122.67
<b>V800</b>	30 minutos	54.6	45.4	139.94
	45 minutos	62.2	37.8	131.58
	60 minutos	68.3	31.7	124.87
<b>C1000</b>	30 minutos	53.9	46.1	140.71
	45 minutos	49.9	50.1	145.11
	60 minutos	74.7	25.3	117.83
<b>V1000</b>	30 minutos	66.6	33.4	126.74
	45 minutos	65.6	34.4	127.84
	60 minutos	66.1	33.9	127.29
<b>K1000</b>	30 minutos	74.9	25.1	117.61
	45 minutos	70.3	29.7	122.67
	60 minutos	62.2	37.8	131.58

**Fuente:** Autor

Para determinar la resistencia del material se tomó la media de las durezas calculadas por temperaturas, para aplicar la Ec. 8

$$S_u = 0.5HB \text{ (kpsi)}$$

**Ec. 19**

$$S_u = 0.5 * 118.38 \text{ (kpsi)}$$

$$S_u = 59.19 \text{ (kpsi)}$$

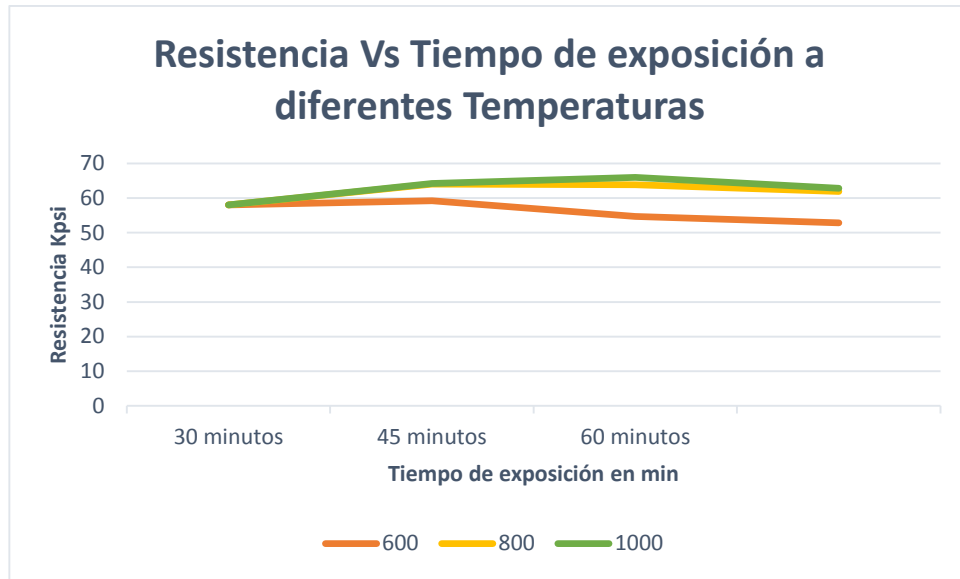
**Tabla 14-4. Resistencia de los promedios de HB**

<b>Tiempo de exposición</b>	<b>Temperatura</b>	<b>Promedio de HB</b>	<b>Resistencia (kpsi)</b>
<b>30 minutos</b>	600	118.38	59.19
<b>45 minutos</b>	600	109.47	54.74
<b>60 minutos</b>	600	105.73	52.87
<b>30 minutos</b>	800	128.06	64.03
<b>45 minutos</b>	800	127.62	63.81
<b>60 minutos</b>	800	123.77	61.89
<b>30 minutos</b>	1000	128.35	64.18
<b>45 minutos</b>	1000	131.87	65.94
<b>60 minutos</b>	1000	125.57	62.78

**Fuente:** Autor

De los resultados del cálculo de Dureza y Resistencia se puede ver que las probetas ensayadas a 600°C mantienen su resistencia a la resistencia del material sin ser expuesto que es de 58 kpsi, y al llegar a una temperatura de 800°C y 1000°C el aumento su resistencia, pero al llegar a la temperatura máxima se mantiene casi lineal con la de 800°C se mantiene casi lineal, lo que se puede visualizar de mejor manera en la Figura 4-37.





**Figura 14-37. Resistencia Vs Tiempo de exposición a diferentes Temperaturas**

**Fuente:** Autor

**Porcentaje de incremento de la resistencia**

Como ya se determinó en el cálculo de la resistencia, esta aumenta y se verificará el porcentaje de aumento de la misma mediante la relación de  $\frac{fu_T}{fu} * 100$

**Para una temperatura de 600°C**

$$\%Incremento\ de\ fu = \frac{fu_T}{fu} * 100$$

$$\%Incremento\ de\ fu = \frac{55.6}{58} * 100$$

$$\%Incremento\ de\ fu = 96\%$$

**Para una temperatura de 800°C**

$$\%Incremento\ de\ fu = \frac{fu_T}{fu} * 100$$

$$\%Incremento\ de\ fu = \frac{63.24}{58} * 100$$

$$\%Incremento\ de\ fu = 109\%$$

**Para una temperatura de 1000°C**

$$\%Incremento\ de\ fu = \frac{fu_T}{fu} * 100$$

$$\%Incremento\ de\ fu = \frac{64.3}{58} * 100$$

$$\%Incremento\ de\ fu = 110.9\%$$

Como se puede ver en la figura 4-37, a temperaturas de 600°C la resistencia es casi igual a la del material sin ser expuesto, y a 800°C y 1000°C la resistencia aumenta en un 10% de la original, debido al fenómeno de recocido del acero, pero al no ser tan inmediato el enfriamiento no llegamos a una fase de martensita, por lo que sigue en la fase de perlita+ferrita.

### **Determinación del esfuerzo de fluencia del acero**

Es necesario para determinar el esfuerzo de fluencia del acero tomar en cuenta los factores de reducción de la tabla 2-2 donde tenemos un factor para cada temperatura a la que está expuesta el material en el momento del flagelo, y utilizar en la Ec.5

$$K(y, T) = f(y, T)/fy \qquad \text{Ec. 20}$$

Donde:

K(y,T) = es el factor de corrección por temperatura

Fy = es el límite de fluencia del acero A36 en sus condiciones originales

f(y,T) = Es el esfuerzo de fluencia del acero a determinada temperatura

Según tabla 2-3

**Tabla 14-5. Coeficiente de temperaturas**

<b>T</b>	<b>K(y,T)=f(y,T)/fy</b>
<b>20°C</b>	1
<b>100°C</b>	1
<b>200°C</b>	1
<b>300°C</b>	1
<b>400°C</b>	1
<b>500°C</b>	0.78
<b>600°C</b>	0.47
<b>700°C</b>	0.23
<b>800°C</b>	0.11
<b>900°C</b>	0.06
<b>1000°C</b>	0.04
<b>1100°C</b>	0.02
<b>1200°C</b>	0

$$K(y, T) = f(y, T) / f_y$$

$$f(y, T) = K(y, T) * f_y$$

$$f(600) = 0.47 * 36ksi$$

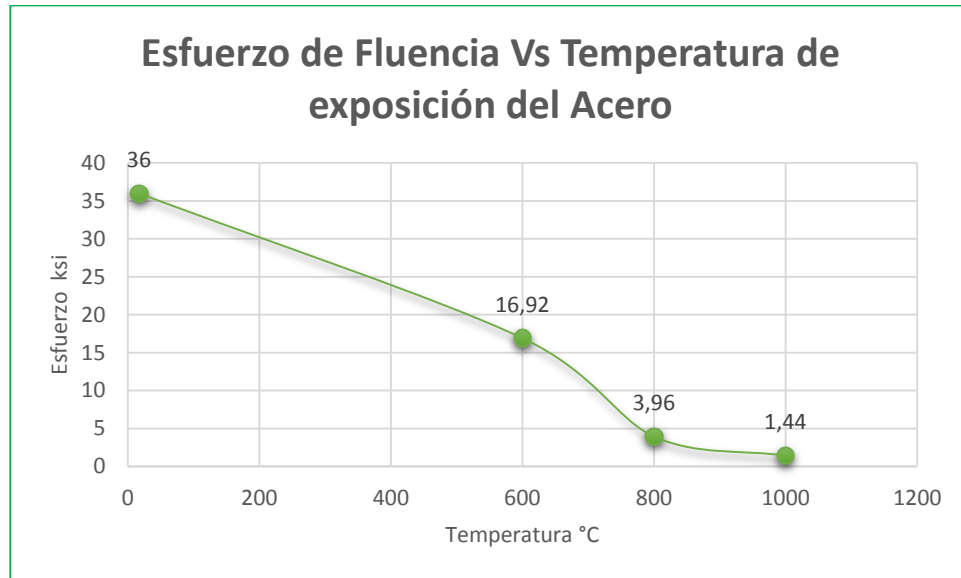
$$f(600) = 16.92ksi$$

$$f(800) = 0.11 * 36ksi$$

$$f(800) = 3.96ksi$$

$$f(1000) = 0.04 * 36ksi$$

$$f(1000) = 1.44ksi$$



**Figura 14-38. Esfuerzo de Fluencia Vs Temperatura de exposición del Acero**

**Fuente:** Autor

De la gráfica se puede visualizar claramente como el esfuerzo del material va decayendo a medida del aumento de temperatura, es decir que el material se volverá más plástico.

#### **Determinación de capacidad de carga**

La capacidad de carga de un elemento está dada por varios factores de diseño, la reducción del límite de fluencia por lo general es de 40% por lo que la capacidad de carga de un elemento viene dada por la relación  $0.6f_y$ , aplicar la Ec.12

$$f_t = 0.6f_y$$

$$f_t = 0.6 * 36ksi$$

$$f_t = 21.6ksi$$

Donde:

$ft$ : Es el esfuerzo permisible del elemento del elemento

$ft_T$ : Es el esfuerzo permisible del elemento del elemento sometido a una temperatura

$$ft_T = 0.6 K_{y,T} * fy$$

$K_{y,T}$ : Tomado de la tabla 2 – 3

**Para una temperatura de 600°C**

$$ft_{600} = 0.6 * 0.47 * 36ksi$$

$$ft_{600} = 10.152 ksi$$

**Porcentaje de reducción de la capacidad de carga a diferentes temperaturas**

$$\%Cc = 1 - \frac{ft_T}{ft}$$

$$\%Cc = 1 - \frac{10.152ksi}{21.6ksi}$$

$$\%Cc = 0.53$$

**Para una temperatura de 800°C**

$$ft_{800} = 0.6 * 0.11 * 36ksi$$

$$ft_{800} = 2.376 ksi$$

**Porcentaje de reducción de la capacidad de carga a diferentes temperaturas**

$$\%Cc = 1 - \frac{ft_T}{ft}$$

$$\%Cc = 1 - \frac{2.376ksi}{21.6ksi}$$

$$\%Cc = 0.89$$

Para una temperatura de 1000°C

$$ft_{1000} = 0.6 * 0.04 * 36ksi$$

$$ft_{1000} = 0.864 ksi$$

Porcentaje de reducción de la capacidad de carga a diferentes temperaturas

$$\%Cc = 1 - \frac{ft_T}{ft}$$

$$\%Cc = 1 - \frac{0.864ksi}{21.6ksi}$$

$$\%Cc = 0.96$$

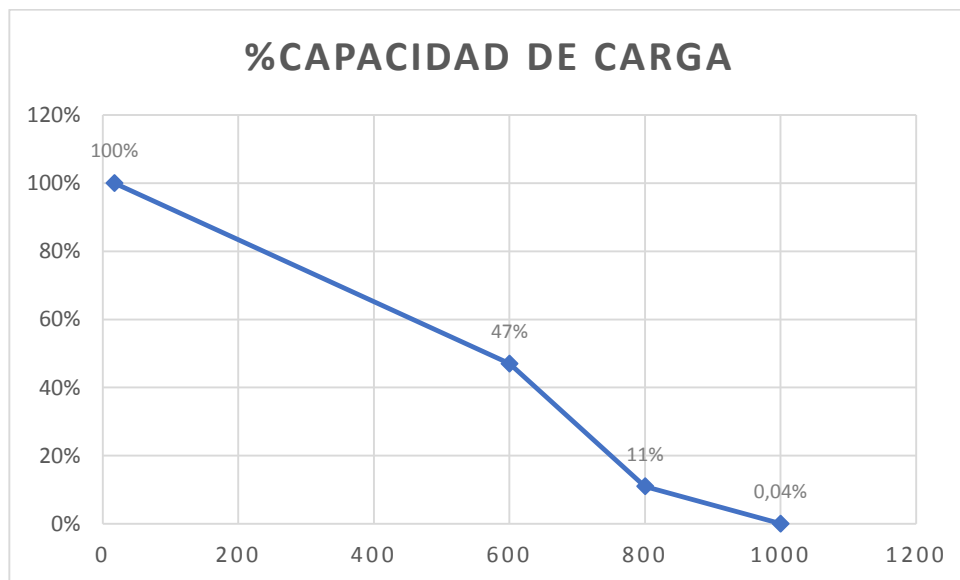


Figura 14-39. % de Capacidad de carga en diferentes temperaturas

Fuente: Autor

Como se puede ver en la figura 4-39 el acero pierde fluencia al elevarse la temperatura a la que se encuentra expuesto, volviéndose rápidamente plástico, sin embargo, en el estudio al ser enfriado rápidamente con agua, esta deformación no es total.

## CAPÍTULO V

### CONCLUSIONES, RECOMENDACIONES

#### 5.1 Conclusiones

Por los antecedentes estudiados de diversos autores, conocemos que el material de acero a pesar de no ser un material combustible, si cambia sus características sometido a temperaturas mayores a los 600°C, y dependiendo del método de enfriamiento se ha encontrado que los aceros pasen a una fase de martensita lo que conlleva a que se vuelva más frágil el material, sin embargo, en este estudio no llego a dicha fase debido a que el enfriamiento no fue lo suficientemente rápido.

De acuerdo con la literatura científica revisada los principales ensayos utilizados para este tipo de análisis son destructivos y no destructivos que nos van a permitir conocer el comportamiento del material después de haber sido expuestos a altas temperaturas midiendo la resistencia, dureza, y microscopia del acero.

El acero pierde fluencia al elevarse la temperatura a la que se encuentra expuesto, siendo así que cuando llega a una exposición de 1000°C pierde su fluencia en un 96% volviéndose rápidamente plástico, sin embargo, en el estudio al ser enfriado rápidamente con agua, esta deformación no es total.

El material expuesto a temperaturas de 600°C su resistencia es casi igual a la del material sin ser expuesto, y a 800°C y 1000°C la resistencia aumenta en un 10% de la original, debido a la elevación de temperatura del acero, pero al no ser tan inmediato el enfriamiento, no cambio de fase.

## **5.2 Recomendaciones**

No se encontraron reportes en la literatura revisada del diseño de un procedimiento a través de tiempos y temperaturas para caracterizar elementos estructurales expuestos a diferentes tiempos y temperaturas debido a un incendio, por lo cual este análisis se basó en los objetivos planteados.

Es necesario hacer un ensayo más de detenido de ensayos no destructivos para ver la posibilidad de seguir usando una estructura después de ser sometida a un flagelo, siempre y cuando se verifique que no ha sufrido deformaciones permanentes.

Investigar sobre la aplicación de algún método práctico para generar un recocido en el material y regresar a las propiedades originales del elemento.

Chatarrizar debido a que las propiedades mecánicas han cambiado considerablemente durante la deformación del material, para esto recuperar a sus condiciones originales se necesita trabajo mecánico y esto genera endurecimiento y ya no es recomendable darle este tratamiento.



## Bibliografía

- [1] “Estructuras metálicas, ventajas respecto a otras formas de construcción,” *Metaldeza*, Jul. 25, 2018. <https://metaldeza.com/las-ventajas-de-las-estructuras-metalicas/> (accessed Feb. 16, 2022).
- [2] “Resistencia al fuego | Arquitectura en acero.” <http://www.arquitecturaenacero.org/uso-y-aplicaciones-del-acero/soluciones-constructivas/resistencia-al-fuego> (accessed Sep. 17, 2021).
- [3] “Comportamiento del Acero con la Temperatura.” <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn107.html> (accessed Feb. 13, 2022).
- [4] L. A. Quispe Sulca and M. N. Quispe Mamani, “Comportamiento del concreto armado tratado superficialmente con pintura intumescente sometido a fuego en la ciudad de Juliaca,” Aug. 2020, Accessed: Jun. 14, 2021. [Online]. Available: <http://200.121.226.32:8080/handle/UPEU/4404>
- [5] A. Lapuebla-Ferri, D. Pons, and M. L. Romero, “Load and temperature influence on the post-fire mechanical properties of steel reinforcements,” *J. Constr. Steel Res.*, vol. 185, p. 106866, Oct. 2021, doi: 10.1016/j.jcsr.2021.106866.
- [6] E. R. Cisneros, L. M. Irigoin, P. Sócrates Muñoz, K. J. Carranza, Á. Q. Rinza, and L. H. Pérez, “EFECTOS DEL FUEGO SOBRE LA RESISTENCIA DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE HORMIGÓN ARMADO: UNA REVISION DE LITERATURA,” *Paideia XXI*, vol. 11, no. 1, Art. no. 1, Apr. 2021, doi: 10.31381/paideia.
- [7] C. Ren, L. Dai, Y. Huang, and W. He, “Experimental investigation of post-fire mechanical properties of Q235 cold-formed steel,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 150, p. 106651, May 2020, doi: 10.1016/j.tws.2020.106651.
- [8] C. Zhang, R. Wang, and G. Song, “Post-fire mechanical properties of Q460 and Q690 high strength steels after fire-fighting foam cooling,” *Thin-Walled Struct.*, vol. 156, p. 106983, Nov. 2020, doi: 10.1016/j.tws.2020.106983.

- [9] H. U. Sajid and R. Kiran, “Influence of stress concentration and cooling methods on post-fire mechanical behavior of ASTM A36 steels,” *Constr. Build. Mater.*, vol. 186, pp. 920–945, Oct. 2018, doi: 10.1016/j.conbuildmat.2018.08.006.
- [10] H. U. Sajid and R. Kiran, “Post-fire mechanical behavior of ASTM A572 steels subjected to high stress triaxialities,” *Eng. Struct.*, vol. 191, pp. 323–342, Jul. 2019, doi: 10.1016/j.engstruct.2019.04.055.
- [11] “Fases de un incendio,” *Puertas Asturmex*, Jun. 22, 2020. <https://puertasasturmex.com/fases-de-un-incendio/> (accessed Sep. 23, 2021).
- [12] X. Virgili Grau, “Comportamiento de elementos estructurales de acero frente a incendio. Análisis de la Normativa,” *The behaviour of steel structural elements against fire. Normative analysis*, vol. 27, Mar. 2018, Accessed: Jun. 13, 2021. [Online]. Available: <https://upcommons.upc.edu/handle/2099.1/6112>
- [13] F. Torres and N. Torres, “Vista de Conceptos básicos y principales metodologías del diseño estructural para condiciones de incendio según normas internacionales, aplicadas al Reglamento Colombiano de Construcciones Sismorresistentes (NSR-10),” *III*, pp. 35–47, Sep. 2018.
- [14] I. Tadanobu, “Toughening of Low-Alloy Steel by Ultrafine-Grained Structure (Development of Fracture Control from Microstructure Design) | IntechOpen,” Oct. 2016, doi: 10.5772 / 63797.
- [15] V. Pignatta, “37220 Estructuras de acero en situación de incendio,” p. 32, 2019.
- [16] “Características mecánicas del acero.” <https://ingemecanica.com/tutorialsemanal/tutorialn100.html> (accessed Feb. 18, 2022).
- [17] D. A. Mora Casas, J. C. Rincón Pulido, S. González Zabala, and L. Pardo Mora, “5° Concurso de diseño en acero para estudiantes de arquitectura en Colombia - 2014: segundo puesto Memoria,” *Rev. Arquít. Vol 16 Ene-Dic 2014 P 134-142*, vol. 16, pp. 134–142, Dec. 2014, doi: 10.14718/RevArq.2014.16.15.

- [18] J. M. A. Riera and M. E. Calafat, “COMPORTAMIENTO DE LAS ARMADURAS ACTIVAS DESPUÉS DE UN FUEGO,” p. 10.
- [19] K. Myung, “A Study on a Fire Extinguisher with Sound Focus - ProQuest,” vol. 20, pp. 4055–4062, Jun. 2017.
- [20] “DISEÑO EN INGENIERIA MECANICA DE SHIGLEY 9ED. – Librerías CODEU.” <https://codeu.org.ec/producto/disenio-en-ingenieria-mecanica-de-shigley-9ed/> (accessed Feb. 12, 2022).
- [21] Š. Jeníček, I. Vorel, and J. Káňa, “Metallographic Observation for Evaluating Microstructural Evolution on Various Cross-Sections of Forged Part upon Air-Cooling from Finishing Temperature,” *Manuf. Technol.*, vol. 18, no. 1, pp. 53–56, Feb. 2018, doi: 10.21062/ujep/52.2018/a/1213-2489/MT/18/1/53.
- [22] “Microscopía Electrónica de Barrido (MEB) | Universidad de Burgos.” <https://www.ubu.es/parque-cientifico-tecnologico/servicios-cientifico-tecnicos/microscopia/microscopia-electronica-de-barrido-meb> (accessed Sep. 23, 2021).
- [23] “Introducción a la Metalurgia Física - Sydney H. Avner,” *La Librería del Ingeniero*, Aug. 04, 2020. <https://www.libreriaingeniero.com/2020/08/introduccion-a-la-metalurgia-fisica-sydney-h-avner.html> (accessed Feb. 12, 2022).

## Anexos

**Anexo A.** Preparación de un horno convencional para simular el incendio con los elementos a ser flagelados.



**Anexo B.** Elementos estructurales expuestos al fuego.



**Anexo C.** Toma de temperatura a 600°C a diferentes tiempos de exposición.



**Anexo D.** Enfriamiento rápido de las probetas expuestas a fuego



**Anexo E.** Ignición provocada con material combustible.



**Anexo F.** Enfriamiento con agua, simulando un evento real.



**Anexo G.** Flagelo simulando un evento real.



**Anexo H.** Diferentes elementos sometidos a elevadas temperaturas.



**Anexo I.** Toma de temperatura a 1000°C



**Anexo J.** Toma de temperatura 800°C

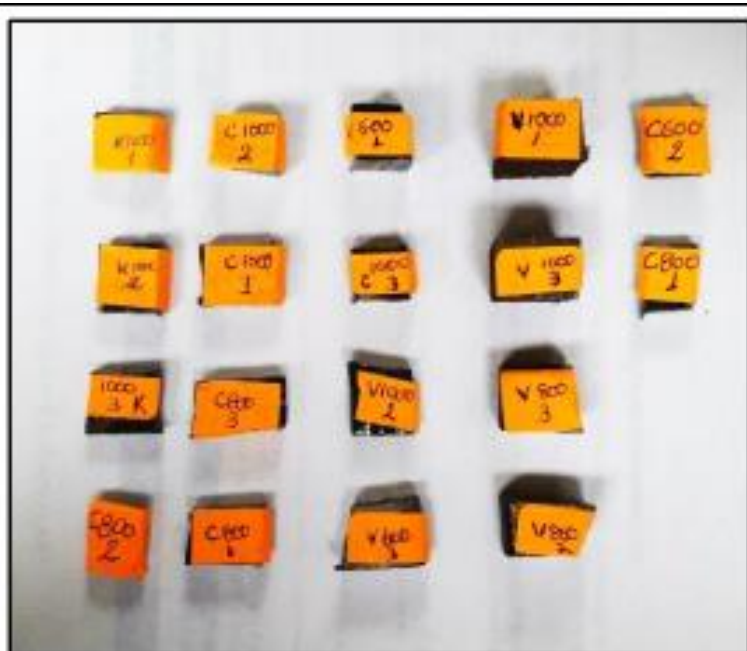




**Anexo K.** Flagelo Total de las muestras.

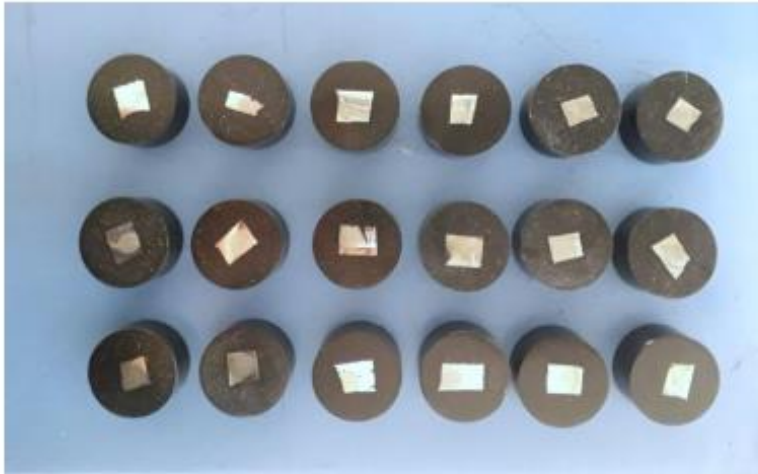


**Anexo L.** Muestras a ensayar.



**Anexo M.**

**PROBETAS A ENSAYAR:**



**Anexo N. Informes de Ensayos de Laboratori**