

# **ESCUELA POLITÉCNICA NACIONAL**

**FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL Y AMBIENTAL**

**ANÁLISIS DEL INCREMENTO DEL ÁREA DE FISURACIÓN Y VARIACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL MORTERO. AFECTACIÓN AL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DE LAS VARILLAS DE ACERO CORRUGADO EMBEBIDAS EN VIGAS DE HORMIGÓN, DESPUÉS DE SER SOMETIDAS A ALTAS TEMPERATURAS.**

**TRABAJO DE TITULACIÓN, PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE INGENIERO CIVIL MENCIÓN ESTRUCTURAS**

**PÉREZ USUAY SKARLET ALEJANDRA**  
skarlet\_ale0694@outlook.es

**ROSERO OBANDO DAYANA LIZETH**  
daliz\_3110@hotmail.com

**DIRECTOR: ING. GERMÁN VINICIO LUNA HERMOSA, MBA.**  
german.luna@epn.edu.ec

**Quito, febrero 2021**

## DECLARACIÓN

Nosotras, **Pérez Usuy Skarlet Alejandra y Rosero Obando Dayana Lizeth**, declaramos bajo juramento que el trabajo aquí descrito es de nuestra autoría; que no ha sido previamente presentado para ningún grado o calificación profesional; y, que hemos consultado las referencias bibliográficas que se incluyen en este documento.

La Escuela Politécnica Nacional puede hacer uso de los derechos correspondientes a este trabajo, según lo establecido por la Ley de Propiedad Intelectual, por su Reglamento y por la normativa institucional vigente.

.....  
Skarlet Alejandra Pérez Usuy

.....  
Dayana Lizeth Rosero Obando

## CERTIFICACIÓN

Certifico que el presente trabajo fue desarrollado por las señoritas Skarlet Alejandra Pérez Usuay y Dayana Lizeth Rosero Obando, bajo mi supervisión.

.....  
**ING. GERMÁN LUNA HERMOSA, MBA.**  
**DIRECTOR DEL PROYECTO**

## AGRADECIMIENTOS

En este trabajo de investigación quiero agradecer a Dios por sus bendiciones, por guiarme en toda mi trayectoria universitaria, por ser el apoyo y fortaleza en los tiempos de debilidad y de mayor dificultad.

Agradezco a mis abuelitos, por ser un ejemplo de esfuerzo y superación que con sus consejos, valores y principios inculcaron en mí la perseverancia para alcanzar mi desarrollo profesional.

A mis padres por su esfuerzo y confianza que me encaminaron a lograr los objetivos propuestos pese a las vicisitudes, pues sin su constante apoyo no hubiese concluido esta etapa de mi vida.

A mis ñaños quienes, con su amor incondicional, han estado siempre presentes dándome el apoyo conveniente para no declinar en las situaciones complicadas y que parecían imposibles.

A mi amiga y compañera de tesis, quien me brindó su amistad y trabajó con ahínco en la ejecución de este trabajo.

A mi director de tesis Ing. Germán Luna, por su compromiso, tiempo y dedicación, porque a lo largo de mi preparación me extendió su mano con valiosos conocimientos.

Al personal del laboratorio LEMSUR por aportar a mi formación personal y profesional brindándome oportunidades y enriqueciendo mi conocimiento.

A mis amigos Juan David, Miguel, Sebas, Francisco, Erick, Sam, Josh, Vero, Singrid y Pao. Por brindarme su apoyo, por estar junto a mí en los buenos y malos momentos, por ser parte de esta importante etapa de vida y compartir tantas experiencias que recordaré por siempre.

Skarlet

## AGRADECIMIENTOS

Agradezco a Dios y a la Virgen María, por haber sido mi fortaleza, mi compañía e iluminarme para tomar las mejores decisiones durante esta trayectoria de vida universitaria.

A mis padres Arturo y Graciela, por haber sido mis personas incondicionales para que esta meta se logre cumplir, que al inicio empezó como un sueño y hoy ha llegado a ser una realidad, nunca me cortaron las alas y siempre me dejaron volar. A mis hermanos Fredy, Katy y Jime, por ser mis guías en este camino, en muchas ocasiones se convirtieron en mis maestros con tal de verme levantar y continuar. A mis sobrinos Ismael, Nicolás y Martín, por siempre sacarme una sonrisa al llegar a casa y hacer que me olvide de todos los problemas. A mis abuelitos, por ser mis angelitos protectores estando junto a mí en todo momento, unos físicamente y otros desde el cielo.

A Skarlet, por ser mi amiga y compañera, porque a pesar de ser tan diferentes siempre supimos llevarnos y logramos que este trabajo se logre culminar.

A mi director de tesis, Ing. Germán Luna, por su tiempo, dedicación, paciencia y orientación durante la elaboración de este proyecto de titulación.

A la Escuela Politécnica Nacional, por haberme ayudado a crecer y a adquirir más conocimientos. Al personal de los laboratorios LEMSUR y de Cerámica, por su amabilidad y siempre ayudar para que los ensayos puedan realizarse.

A todos mis amigos de la universidad, por regalarme lindas experiencias y hacer que este camino sea más divertido. A muchas personas especiales que llevo en mi corazón, que hicieron que me sintiera como en casa a pesar de estar lejos de mi familia, por convertirse en mi apoyo y ser esenciales para que logre cumplir mi sueño.

Dayana

## DEDICATORIA

A mi padre, porque a pesar de la distancia me dio su valioso apoyo para culminar mi carrera universitaria.

Merece reconocimiento especial mi madre, mi motor y mi mayor inspiración, pues su ejemplo de perseverancia ha sido el soporte del recorrido de este proceso y ha llenado mi vida con su amor y sus valiosos consejos.

A mis abuelitos, porque han sido como unos padres, amigos y maestros; que han iluminado mi vida con su apoyo, amor y paciencia, quienes hasta con los más pequeños detalles me llenaron de sonrisas y recuerdos.

## DEDICATORIA

A mis padres Arturo y Graciela, por siempre confiar en mí, por ser mis mejores amigos y confidentes, nunca me dejaron caer y que con una llamada hacían que mi vida se reinicie; por haberse esforzado tanto, para que este sueño hoy logre convertirse en una realidad.

A mis hermanos Fredy, Katy y Jime, por todos los consejos que me han brindado, por siempre apoyarme y consentirme, ya que para ustedes nunca dejé de ser la chiquita de la casa.

A mis chiquitines Ismael, Nicolás y Martín, por ser mi motivo para sonreír, porque con sus locuras y ocurrencias han logrado que mi vida sea distinta.

A mis abuelitos Mardoqueo y Clarita, Alonso y Lolita, por ser esas personitas llenas de sabiduría, que supieron compartirme los mejores conocimientos y valores para enfrentarme a la vida.

Dayana

## RESUMEN

El presente estudio de titulación se refiere a la elaboración de cubos de mortero de 50 mm de arista y vigas de hormigón armado con diferentes recubrimientos, que fueron expuestos a altas temperaturas de (100°, 200°, 300°, 400°, 500° y 600°C), los cubos de mortero; y, (300°C, 600°C y 900°C) las vigas, en base a la curva de simulación de incendios ISO 834, durante una, dos y tres horas en el horno programable de Laboratorio de Cerámica de la Facultad de Ingeniería Química y Agroindustrial, EPN. Y así conocer la variación de las propiedades mecánicas del mortero y de la varilla de acero corrugado.

A continuación, se realizó un registro fotográfico de las caras de los cubos con el propósito de determinar el posible incremento de área de fisuración; posteriormente, las probetas fueron ensayadas a compresión, para conocer la afectación en su resistencia por efecto de las altas temperaturas.

Por otro lado, las varillas de acero corrugado embebidas en las vigas de hormigón, estuvieron sometidas a ensayos de tracción, esto para evidenciar la variación de las propiedades mecánicas del acero: resistencia, ductilidad, elasticidad, resiliencia y tenacidad; después de haber sido sometidas a altas temperaturas, diferentes tiempos de exposición y con distintos espesores de recubrimiento.

Finalmente, se realizaron gráficas que comparan y visualizan la afectación sufrida en cada una de las propiedades analizadas de cada material, con relación a los resultados de una probeta patrón. Y, además, se propone una relación matemática entre el porcentaje del área de fisuramiento con la resistencia a compresión del mortero y la relación entre el espesor del recubrimiento con las propiedades mecánicas (resistencia, ductilidad, elasticidad, tenacidad y resiliencia) del acero corrugado. Todo por la afectación térmica.

**Palabras clave:** mortero, acero, altas temperaturas, fisuración, compresión, recubrimiento, tracción.

## ABSTRACT

This thesis study refers to the elaboration of mortar cubes with 50 mm edges and reinforced concrete beams with different kinds of covering that were exposed to high temperatures, the mortar cubes to temperatures of (100°, 200°, 300°, 400°, 500° and 600°C) and the beams to (300°C, 600°C and 900°C), based on the fire simulation curve ISO 834 curve during one, two and three hours in the programmable oven in the Ceramics Laboratory of the Faculty of Chemistry and Agro-industrial Engineering ENP in order to obtain information about the variation of the mechanical properties of mortar and corrugated steel bars.

Next, a photo register was made of the faces of the cubes to determine the possible increase of the cracking area; after that, the test pieces were tested under compression to know how their resistance was affected by the high temperatures.

On the other hand, the corrugated steel bars absorbed in the concrete beams, were submitted to traction tests in order to evidence the variation of the mechanical properties of steel: resistance, ductility, elasticity, resilience, and tenacity after having been submitted to high temperatures, different times of exposure with different coverings.

Finally, graphs were made that compare and visualize the affectation of each of the properties analyzed of each material with the results of one test piece pattern. And, furthermore, a mathematical relationship between the percentage of the cracking area and the resistance to compression of mortar and the relationship between the thickness of the covering and the mechanical properties (resistance, ductility, elasticity, tenacity and resilience) of corrugated steel was proposed. All this due to the thermic affection.

**Key words:** mortar, steel, high temperatures, cracking, compression, covering, traction.

## PRESENTACIÓN

El presente trabajo de titulación está compuesto por seis capítulos, los cuales se detallan a continuación:

En el Capítulo 1 se desarrolla la introducción, misma que brinda los antecedentes que motivan el estudio de este tema, además se expone los objetivos y el alcance que se proporcionará a la investigación.

En el Capítulo 2 se describe el marco teórico, en donde se indica las bases y conocimientos teóricos del incendio, mortero, hormigón y acero; que servirán como guía para el desarrollo de este estudio.

En el Capítulo 3 se indica la metodología aplicada para el desarrollo de todo el proyecto. Se expone todas las combinaciones de temperatura–tiempo de exposición para el análisis del mortero en cubos, las combinaciones de temperatura–tiempo–recubrimiento para el análisis de las varillas de acero corrugado embebidas en vigas de hormigón; además de los materiales, dosificación, equipo e instrumentación para la fabricación de ambos elementos de estudio.

En el capítulo 4 está detallado el procedimiento que se siguió para el diseño, fabricación y los ensayos que se van a realizar, junto con el proceso de afectación térmica de las probetas.

El capítulo 5 tiene dos partes de análisis; en la primera se realiza el análisis de resultados de la resistencia a compresión, obtenida en cubos de mortero de 50 mm de arista, además del área de fisuración calculada, porcentaje de afectación y la relación matemática. La segunda parte está enfocada en analizar las propiedades mecánicas del acero, en base a los resultados obtenidos de los ensayos a tracción en varillas de acero corrugado, los porcentajes de afectación y la relación matemática.

En el capítulo 6 se encuentran las conclusiones generadas por este estudio; desde el planteamiento del problema, hasta el análisis de cada una de las propiedades de ambos elementos de interés. Así mismo, se representa las recomendaciones basadas en la experiencia lograda, a fin de facilitar mejoras en estudios similares futuros.

Para terminar, se presenta la bibliografía utilizada en el curso del desarrollo de este proyecto, adicionalmente se encuentran los anexos que muestran los informes con los resultados de los ensayos realizados en el Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas de la FICA-EPN.

## ÍNDICE

DECLARACIÓN .....	I
CERTIFICACIÓN .....	II
AGRADECIMIENTOS .....	III
AGRADECIMIENTOS .....	IV
DEDICATORIA .....	V
DEDICATORIA .....	VI
RESUMEN .....	VII
ABSTRACT .....	VIII
PRESENTACIÓN .....	IX
ÍNDICE .....	XI
LISTADO DE FIGURAS .....	XVI
LISTADO DE TABLAS .....	XXI
1. INTRODUCCIÓN .....	1
1.1. ANTECEDENTES .....	1
1.2. OBJETIVOS .....	3
1.2.1. Objetivo General .....	3
1.2.2. Objetivos Específicos .....	3
1.3. ALCANCE .....	4
2. MARCO TEÓRICO .....	5
2.1. INCENDIO .....	5
2.1.1. Definición .....	5
2.1.2. Fases del fuego .....	5
2.1.3. Fases del incendio .....	6
2.1.4. Clasificación de incendios .....	7

2.1.5.	Curva de fuego estándar .....	8
2.1.6.	Criterios del diseño contra incendios .....	9
2.2.	MORTERO .....	10
2.2.1.	Definición .....	10
2.2.2.	Evolución histórica del mortero .....	11
2.2.3.	Tipos y usos de mortero .....	14
2.2.4.	Propiedades de los morteros .....	17
2.3.	HORMIGÓN .....	19
2.3.1.	Cemento .....	20
2.3.2.	Agua .....	23
2.3.3.	Agregados .....	26
2.3.4.	Propiedades mecánicas .....	27
2.4.	ACERO .....	30
2.4.1.	Propiedades mecánicas .....	32
2.5.	ESTADO DEL ARTE .....	35
2.5.1.	Mortero .....	35
2.5.2.	Hormigón armado .....	40
3.	METODOLOGÍA .....	44
3.1.	CUBOS DE MORTERO .....	44
3.1.1.	Cantidad de probetas .....	44
3.1.2.	Materiales .....	45
3.1.3.	Dosificación de cubos .....	46
3.1.4.	Equipo e instrumentación para cubos .....	47
3.2.	VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO .....	50
3.2.1.	Cantidad de probetas de vigas .....	50
3.2.2.	Materiales .....	52
3.2.3.	Dosificación para vigas .....	53

3.2.4. Equipo e instrumentación para vigas .....	53
4. DISEÑO, FABRICACIÓN Y ENSAYO DE PROBETAS .....	58
4.1. CUBOS DE MORTERO .....	58
4.1.1. Prototipo de Encofrados .....	58
4.1.2. Secado de la Arena .....	59
4.1.3. Tamizado de la Arena.....	59
4.1.4. Dosificación de la arena.....	60
4.1.5. Preparación de la Mezcla .....	61
4.1.6. Determinación del Flujo .....	63
4.1.7. Preparación de probetas.....	65
4.1.8. Desencofrado de probetas.....	66
4.1.9. Afectación térmica de cubos .....	67
4.1.10. Registro fotográfico de cubos de mortero .....	68
4.1.11. Ensayo a compresión .....	73
4.2. VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO .....	79
4.2.1. Elaboración de Encofrados .....	79
4.2.2. Secado de Agregados Fino y Grueso .....	80
4.2.3. Tamizado del Ripio .....	81
4.2.4. Dosificación del ripio .....	83
4.2.5. Dosificación del hormigón .....	86
4.2.6. Elaboración del hormigón .....	89
4.2.7. Elaboración de vigas.....	91
4.2.8. Desencofrado de probetas.....	92
4.2.9. Afectación térmica de vigas .....	94
4.2.10. Extracción de varillas .....	95
4.2.11. Ensayo a tracción de varillas .....	96
5. ANÁLISIS DE RESULTADOS .....	97

5.1. Propiedades de cubos de mortero.....	97
5.1.1. Cálculo del área de fisuración.....	97
5.1.2. Resistencia a compresión.....	99
5.1.3. Resultados gráficos del área de fisuración en función del tiempo y de la temperatura en exposición.....	103
5.1.4. Resultados gráficos de la resistencia a compresión $f_c$ en función del tiempo y de la temperatura en exposición.....	104
5.1.5. Resultados de la afectación del área de fisuramiento.....	106
5.1.6. Resultados de la afectación de la resistencia a compresión.....	109
5.2. RELACIÓN MATEMÁTICA ENTRE EL PORCENTAJE DEL ÁREA DE FISURAMIENTO CON LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL MORTERO.....	112
5.3. PROPIEDADES DE VARILLAS DE ACERO.....	115
5.3.1. Resistencia a tracción.....	115
5.3.2. Resultado gráfico de la resistencia a tracción en función del tiempo, temperatura y recubrimiento.....	121
5.3.3. Ductilidad.....	123
5.3.4. Resultado gráfico de la ductilidad en función del tiempo, temperatura y recubrimiento.....	129
5.3.5. Esfuerzo de fluencia.....	131
5.3.6. Resultado gráfico del esfuerzo de fluencia en función del tiempo, temperatura y recubrimiento.....	137
5.3.7. Módulo de elasticidad.....	139
5.3.8. Resultado gráfico del esfuerzo del módulo de elasticidad en función del tiempo, temperatura y recubrimiento.....	146
5.3.9. Resiliencia.....	148
5.3.10. Resultado gráfico del esfuerzo de la resiliencia en función del tiempo, temperatura y recubrimiento.....	154

5.3.11. Tenacidad.....	156
5.3.12. Resultado gráfico del esfuerzo de la tenacidad en función del tiempo, temperatura y recubrimiento.....	162
5.3.13. Resultados de la afectación de las propiedades del acero.....	164
5.4. RELACIÓN MATEMÁTICA ENTRE EL RECUBRIMIENTO Y LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO.....	173
6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES.....	182
6.1. CONCLUSIONES.....	182
6.2. RECOMENDACIONES.....	187
7. BIBLIOGRAFÍA.....	189
8. ANEXOS.....	195
8.1. ANEXO 1: REGISTRO FOTOGRÁFICO DE CUBOS ANTES DE LA AFECTACIÓN TÉRMICA.....	195
8.2. ANEXO 2: INFORMES DE ENSAYOS DE GRANULOMETRÍA.....	200
8.3. ANEXO 3: INFORMES DE ENSAYOS DE COMPRESIÓN CÚBICA DE MORTEROS DE CEMENTO.....	204
8.4. ANEXO 4: INFORMES DE ENSAYOS A TRACCIÓN DE VARILLAS DE ACERO.....	210

## LISTADO DE FIGURAS

Figura 1.1. Factores de reducción de la relación tensión-deformación del acero al carbono a temperaturas elevadas .....	2
Figura 2.1. Triángulo del fuego. ....	5
Figura 2.2. Fases del fuego.....	6
Figura 2.3. Fases del incendio. ....	7
Figura 2.4. Curva normalizada temperatura-tiempo .....	8
Figura 2.5. Tiempo de resistencia al fuego - norma ecuatoriana .....	9
Figura 2.6. Tiempo de resistencia al fuego [min] - norma brasileña.....	10
Figura 2.2.1. Tipos de mortero, dosificación y resistencia mínima compresión a los 28 días.. ....	15
Figura 2.2.2. Clasificación y dosificación por volumen de mortero de relleno.....	16
Figura 2.2.3 Cambios de longitud de un cemento de contracción compensada, de concreto conteniendo cemento Tipo E-1 (s) y de concreto conteniendo cemento Portland Tipo I .....	23
Figura 2.2.4. Tolerancia de concentraciones de impurezas en el agua de mezcla. .	24
Figura 2.2.5. Curva esfuerzo – Deformación.....	28
Figura 2.2.6. Curva típica de flujo plástico (Concreto sometido a un esfuerzo de 4.14 MPa (600 Psi)) .....	30
Figura 2.2.7. Diagrama esfuerzo-deformación para un acero estructural en tensión .....	33
Figura 2.2.8. Representación gráfica de resiliencia. ....	34
Figura 2.2.9. Representación gráfica de tenacidad. ....	35
Figura 2.2.10. Evolución de las resistencias a compresión. ....	40
Figura 2.2.11. Variaciones más significativas del módulo de rotura con el tiempo de exposición a una temperatura constante.....	41
Figura 3.1. Cemento Tipo GU. ....	46

Figura 3.2. Mezcladora mecánica planetaria. ....	48
Figura 3.3. Mesa de flujo. ....	48
Figura 3.4. Encofrado de cubos. ....	49
Figura 3.5. Horno utilizado para la afectación térmica de cubos de mortero. ....	49
Figura 3.6. Máquina de ensayos Suzpecar. ....	50
Figura 3.7. Cemento Tipo GU. ....	52
Figura 3.8. Concretera de 1m <sup>3</sup> de capacidad. ....	54
Figura 3.9. Horno Nabertherm empleado para la afectación térmica de vigas de hormigón armado. ....	54
Figura 3.10. Encofrado de vigas. ....	55
Figura 3.11. Marco de prueba hidráulico universal. ....	56
Figura 3.12. Unidad de adquisición de datos. ....	56
Figura 3.13. Extensómetro. ....	57
Figura 4.1. Prototipo de encofrados de cubos. ....	58
Figura 4.2. Secado de arena. ....	59
Figura 4.3. Tamizado de arena. ....	60
Figura 4.4. Curva granulométrica de arena. ....	61
Figura 4.5. Arena graduada normalizada. ....	61
Figura 4.6: Materiales para mortero. ....	62
Figura 4.7: Mezcla de mortero. ....	62
Figura 4.8. Mortero en molde de flujo. ....	63
Figura 4.9. Mortero sobre la mesa de flujo. ....	64
Figura 4.10. Diámetro de ensayo de flujo. ....	64
Figura 4.11. Orden de apisonado.....	65
Figura 4.12. Enrazado de cubos. ....	66
Figura 4.13. Fraguado de cubos. ....	66
Figura 4.14. Desencofrado, etiquetado y curado de cubos. ....	67
Figura 4.15. Cubos tratados.....	73

Figura 4.16. Compresión de cubo. ....	74
Figura 4.17. Registro de carga máxima. ....	74
Figura 4.18. Probetas ensayadas en las condiciones de exposición indicadas, tiempo y temperatura. ....	79
Figura 4.19. Prototipo de encofrados de vigas. ....	80
Figura 4.20. Secado de agregados. ....	80
Figura 4.21. Tamizado de ripio. ....	83
Figura 4.22. Curva granulométrica del agregado grueso, viga 7.2 cm.....	84
Figura 4.23. Curva granulométrica del agregado grueso, viga 9.2 cm.....	85
Figura 4.24. Curva granulométrica del agregado grueso, viga 11.2 cm.....	86
Figura 4.25. Materiales para hormigón. ....	89
Figura 4.26. Colocación de materiales en la mezcladora. ....	90
Figura 4.27. Descarga de concreto en la bandeja. ....	90
Figura 4.28. Engrasada de encofrado de vigas. ....	91
Figura 4.29. Preparación de vigas. ....	91
Figura 4.30. Varillado de vigas. ....	92
Figura 4.31. Enrazado de vigas. ....	92
Figura 4.32. Fraguado de vigas. ....	93
Figura 4.33. Curado de vigas. ....	93
Figura 4.34. Vigas calentadas. ....	95
Figura 4.35. Rotura de vigas. ....	96
Figura 5.1. Gráfica de fisuras antes y después. ....	97
Figura 5.2. Área de fisuración de cubos de mortero [cm <sup>2</sup> ] vs. Tiempo de exposición [h]. ....	103
Figura 5.3. Área de fisuración de cubos de mortero [cm <sup>2</sup> ] vs. Temperatura [°C]. ..	104
Figura 5.4. Resistencia a compresión de cubos de mortero [MPa] vs. Tiempo de exposición [h]. ....	105

Figura 5.5. Resistencia a compresión de cubos de mortero [MPa] vs. Temperatura [°C].	105
Figura 5.6 Porcentaje de afectación del área de fisuración.	109
Figura 5.7. Porcentaje de afectación de la resistencia a compresión.	112
Figura 5.8. Relación de las propiedades del mortero para 100°.	113
Figura 5.9. Relación de las propiedades del mortero para 200°.	114
Figura 5.10 Relación de las propiedades del mortero para 300°.	114
Figura 5.11. Relación de las propiedades del mortero para 400°.	114
Figura 5.12. Relación de las propiedades del mortero para 500°.	114
Figura 5.13. Relación de las propiedades del mortero para 600°.	115
Figura 5.14. Esfuerzo máximo de varillas de acero [MPa] vs. Tiempo exposición [h].	121
Figura 5.15. Esfuerzo máximo de varillas de acero [MPa] vs. Temperatura [°C].	122
Figura 5.16. Esfuerzo máximo de varillas de acero [MPa] vs. Recubrimiento [cm].	122
Figura 5.17. Ductilidad de varillas de acero [%] vs. Tiempo de exposición [h].	129
Figura 5.18. Ductilidad de varillas de acero [%] vs. Temperatura [°C].	130
Figura 5.19. Ductilidad de varillas de acero [%] vs. Recubrimiento [cm].	130
Figura 5.20. Esfuerzo de fluencia de varillas de acero [MPa] vs. Tiempo de exposición [h].	137
Figura 5.21. Esfuerzo de fluencia de varillas de acero [MPa] vs. Temperatura [°C].	138
Figura 5.22. Esfuerzo de fluencia de varillas de acero [MPa] vs. Recubrimiento [cm].	138
Figura 5.23. Módulo de elasticidad [MPa] vs. Tiempo de exposición [h].	146
Figura 5.24. Módulo de elasticidad [MPa] vs. Temperatura [°C].	147
Figura 5.25. Módulo de elasticidad [MPa] vs. Recubrimiento [cm].	147
Figura 5.26. Resiliencia [MPa] vs. Tiempo de exposición [h].	154

Figura 5.27. Resiliencia [MPa] vs. Temperatura [°C].	155
Figura 5.28. Resiliencia [MPa] vs. Recubrimiento [cm].	155
Figura 5.29. Tenacidad [MPa] vs. Tiempo de exposición [h].	162
Figura 5.30. Tenacidad [MPa] vs. Temperatura [°C].	163
Figura 5.31. Tenacidad [MPa] vs. Recubrimiento [cm].	163
Figura 5.32. Porcentaje de afectación del esfuerzo máximo.	170
Figura 5.33. Porcentaje de afectación de la ductilidad.	170
Figura 5.34. Porcentaje de afectación del esfuerzo de fluencia.	171
Figura 5.35. Porcentaje de afectación del módulo de elasticidad.	171
Figura 5.36. Porcentaje de afectación de la resiliencia.	172
Figura 5.37. Porcentaje de afectación de la tenacidad.	172
Figura 5.38. Relación esfuerzo máximo para 1h.	174
Figura 5.39. Relación esfuerzo máximo para 2h.	174
Figura 5.40. Relación esfuerzo máximo para 3h.	175
Figura 5.41. Relación ductilidad para 1h.	175
Figura 5.42. Relación ductilidad para 2h.	176
Figura 5.43. Relación ductilidad para 3h.	176
Figura 5.44. Relación esfuerzo de fluencia para 1h.	177
Figura 5.45. Relación esfuerzo de fluencia para 2h.	177
Figura 5.46. Relación esfuerzo de fluencia para 3h.	178
Figura 5.47. Módulo de elasticidad para 1h.	178
Figura 5.48. Módulo de elasticidad para 2h.	179
Figura 5.49. Módulo de elasticidad para 3h.	179
Figura 5.50. Resiliencia para 1h.	180
Figura 5.51. Resiliencia para 2h.	180
Figura 5.52. Resiliencia para 3h.	181

## LISTADO DE TABLAS

Tabla 3.1. Número de probetas de mortero a fabricar. ....	44
Tabla 3.2. Granulometría arena Ottawa. ....	45
Tabla 3.3. Dosificación estándar de cubos de mortero. ....	46
Tabla 3.4. Dosificación para 12 cubos de mortero. ....	47
Tabla 3.5. Número de probetas de hormigón armado a fabricar. ....	51
Tabla 3.6. Dosificación para hormigón. ....	53
Tabla 4.1. Dosificación de arena. ....	60
Tabla 4.2. Resultado % de flujo ....	65
Tabla 4.3. Ciclos de exposición térmica de cubos. ....	68
Tabla 4.4. Requisito de gradación para áridos gruesos. ....	82
Tabla 4.5. Dosificación ripio viga 7.2cm. ....	83
Tabla 4.6. Dosificación ripio viga 9.2cm. ....	84
Tabla 4.7. Dosificación ripio viga 11.2cm. ....	85
Tabla 4.8. Dosificación hormigón viga 7.2cm. ....	88
Tabla 4.9. Dosificación hormigón viga 9.2cm. ....	88
Tabla 4.10. Dosificación hormigón viga 11.2cm. ....	88
Tabla 4.11. Ciclos de afectación térmica de vigas. ....	94
Tabla 5.1. Área de fisuración de cubos de mortero. ....	98
Tabla 5.2. Resistencia a compresión de cubos de mortero. ....	99
Tabla 5.3. Resistencia a compresión final de cubos de mortero. ....	101
Tabla 5.4. Afectación del área de fisuramiento. ....	107
Tabla 5.5. Afectación de la resistencia a compresión. ....	110
Tabla 5.6. Resistencia a tracción de varillas de acero. ....	116
Tabla 5.7. Euctilidad de varillas de acero. ....	124
Tabla 5.8. Esfuerzo de fluencia de varillas de acero. ....	132
Tabla 5.9. Módulo de elasticidad de varillas de acero. ....	140

Tabla 5.10. Resiliencia de varillas de acero. ....	149
Tabla 5.11. Tenacidad de varillas de acero. ....	157
Tabla 5.12. Porcentaje de afectación a las propiedades de varillas de acero. ....	165

# CAPÍTULO 1

## 1. INTRODUCCIÓN

### 1.1. ANTECEDENTES

De estudios previos, se ha llegado a establecer que cuando el hormigón estructural se ve sujeto a la acción de altas temperaturas por efecto de un incendio, éste pierde su capacidad resistente a la compresión, fundamentalmente por degradación de la matriz (mortero) que aglutina a los áridos gruesos y en el caso del acero existe un efecto de cristalización (Villacís & Ortiz, 2002) y (Castro & Sánchez, 2019).

Las conclusiones de estos estudios dicen que, con la acción de la temperatura, el hormigón se torna deleznable y deteriorado, además comprobaron que las resistencias se afectan de manera significativa cuando se alcanza los 600 °C, sin embargo, no se estudió una relación entre el área de fisuramiento con la resistencia a compresión del mortero. Así mismo se ha detectado variaciones en el comportamiento mecánico de los elementos de acero que se emplearon como refuerzo, pero no se realizó un estudio que relacione la influencia del recubrimiento ni el nivel de afectación.

Todos los materiales que son expuestos a cambios térmicos sufren modificaciones en sus propiedades. Los cambios no son tan fáciles de apreciar cuando las temperaturas son menores a 200°C, pero si la temperatura aumenta, el elemento de hormigón va a sufrir afectaciones muy notables, el cambio depende del origen y de la composición de los agregados que se haya empleado para la elaboración del hormigón. (Sánchez et al., 2002)

Según Alejandro Sánchez, el hormigón puede alcanzar los 75°C sin sufrir alteraciones físicas o mecánicas; pero si supera los 100°C, el agua que se encuentra almacenada en los poros se pierde y por ende la resistencia decae. (Sánchez et al., 2002)

En los aceros estructurales, desde el punto de vista de diseño, cuando están expuestos a temperatura ambiente no es necesario considerar la pérdida de resistencia y rigidez porque varía muy poco, pero a partir de temperaturas que están por encima de los 400°C pierden resistencia y rigidez rápidamente; como se sustenta en la Tabla 3.1 “Factores de reducción de la relación tensión-deformación del acero al carbono a temperaturas elevadas” del Eurocode 3. (Eurocode, 1993; Valencia, 2006)

<b>Factores de reducción para la relación tensión-deformación del acero al carbono a elevadas temperaturas.</b>			
Temperatura $\theta$ [°C]	Factor de reducción $k_{p,\theta}$	Factor de reducción $k_{y,\theta}$	Factor de reducción $k_{E,\theta}$
20	1.000	1.000	1.000
100	1.000	1.000	1.000
200	0.807	1.000	0.900
300	0.613	1.000	0.800
400	0.420	1.000	0.700
500	0.360	0.780	0.600
600	0.180	0.470	0.310
700	0.075	0.230	0.130
800	0.050	0.110	0.090
900	0.0375	0.060	0.0675
1000	0.0250	0.040	0.0450
1100	0.0125	0.020	0.0225
1200	0.000	0.000	0.000
<b>Nota:</b> Para valores de temperatura intermedios se puede usar una interpolación lineal.			

Figura 1.1. “Factores de reducción de la relación tensión-deformación del acero al carbono a temperaturas elevadas”

Fuente: (Eurocode 3, 2005)

En los incendios, dependiendo del material combustible, se pueden alcanzar temperaturas muy elevadas, en los que se conoce que el hormigón y el acero de

refuerzo no solo van a sufrir afectaciones físicas, sino que sus resistencias van a ser notoriamente afectadas. El calor ingresa por las caras externas de los elementos, por lo tanto, estas serán las más afectadas, sin embargo, es importante conocer qué cantidad de calor penetra hasta la parte interior donde está el acero de refuerzo y cómo provocaría cambios de sus propiedades mecánicas: resistencia, ductilidad, elasticidad, tenacidad y resiliencia. (Páez, 1986)

## **1.2. OBJETIVOS**

### **1.2.1. OBJETIVO GENERAL**

Analizar mediante ensayos de laboratorio los efectos en la resistencia a compresión con relación al porcentaje de área de fisuramiento del mortero; variación de las propiedades mecánicas de las barras de acero embebidas en vigas de hormigón después de haber sido expuestas a altas temperaturas.

### **1.2.2. OBJETIVOS ESPECÍFICOS**

- Determinar el porcentaje del área de fisuramiento de cubos de 5x5 cm de mortero luego a haber sido sometidos a diferentes temperaturas y distintos tiempos de exposición.
- Comparar la variación de la resistencia a compresión de los cubos de mortero después de haber permanecido en el horno a altas temperaturas con diferentes tiempos de exposición con relación a un patrón.
- Determinar la resistencia a tracción de las barras de acero embebidas en vigas de hormigón, con variación de recubrimiento 3cm, 4cm y 5cm, después de haber sido afectadas a 300°C, 600°C y 900°C durante un tiempo de 1, 2 y 3 horas y compararla con un patrón.

- Determinar los cambios de las propiedades mecánicas: ductilidad, elasticidad, tenacidad y resiliencia; de las barras de acero mediante la gráfica de esfuerzo-deformación obtenida del ensayo a tracción.
- Generar una relación matemática entre el porcentaje del área de fisuramiento con la resistencia a compresión del mortero y la relación entre el espesor del recubrimiento con las propiedades mecánicas: resistencia, ductilidad, elasticidad, tenacidad y resiliencia del acero corrugado, que permita el diagnóstico de estructuras afectadas.

### **1.3. ALCANCE**

El presente trabajo de titulación tiene como fin, realizar el análisis del mortero usado para hormigón, en cubos de 5x5 cm, sometidos a temperaturas de 100°, 200°, 300°, 400°, 500° y 600°C durante un tiempo de 1, 2 y 3 horas, para conocer el incremento del área de fisuramiento superficial conforme varía la temperatura o tiempo de exposición, y de ahí relacionarlas con la variación que se va a presentar en la resistencia a compresión. Además, se realizará el análisis del cambio de las propiedades mecánicas (resistencia, ductilidad, elasticidad, tenacidad y resiliencia), de una varilla de acero de 12 mm, de 50 cm de longitud, embebida en vigas de hormigón, con una variación de recubrimiento de 3, 4 y 5 cm; que va a ser expuesta a temperaturas de 300°, 600° y 900°C, durante un tiempo de exposición de 1, 2 y 3 horas.

Se enfoca en dar continuidad a las tesis mencionadas en la introducción. El aporte consiste en llegar a conocer si existe una relación entre los cambios físicos, fisuramiento superficial, y los efectos causados por altas temperaturas en la pasta (mortero) cuando se analice la resistencia a compresión y, además, la afectación en las propiedades mecánicas del acero de reforzamiento embebido en los elementos estructurales.

## CAPÍTULO 2

### 2. MARCO TEÓRICO

#### 2.1. INCENDIO

##### 2.1.1. DEFINICIÓN

El incendio es un fenómeno al que se puede definir como un evento donde el fuego no puede ser controlado, el cual es originado en el espacio y tiempo de un sistema que no posee las condiciones para resistir este fenómeno. Para comprender mejor el concepto de incendio se debe aclarar que el fuego es producto de una combustión y que esta es una reacción química producida en la presencia de una energía de activación, entre un cuerpo combustible y un comburente; generando calor, gases, llamas y humo. (Albornoz et al., 2016; Carrera & Irigoyen, 2018; Castro & Sánchez, 2019)



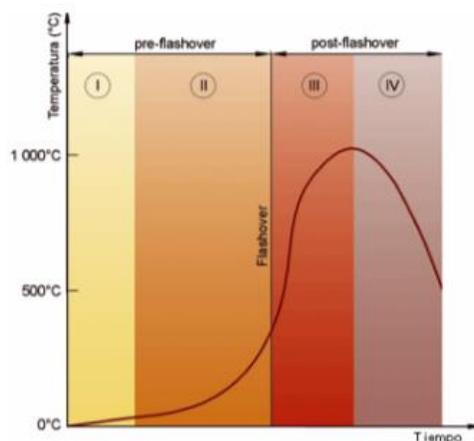
Figura 2.1. Triángulo del Fuego.

Fuente: (Albornoz et al., 2016)

##### 2.1.2. FASES DEL FUEGO

- Fase I: Conforme la temperatura aumenta, el combustible desprende partículas imperceptibles en la vista.

- Fase II: Aparece humo y vapores que son generados por la concentración de partículas que ya son visibles para el ojo humano.
- Fase III: Los vapores se transforman en llamas debido a la cantidad de oxígeno y esto da paso a un aumento de humo y emanación de calor.
- Fase IV: Se puede producir explosiones debido a la gran cantidad de gases y vapores que se genera. (Virgili Grau, 2007)



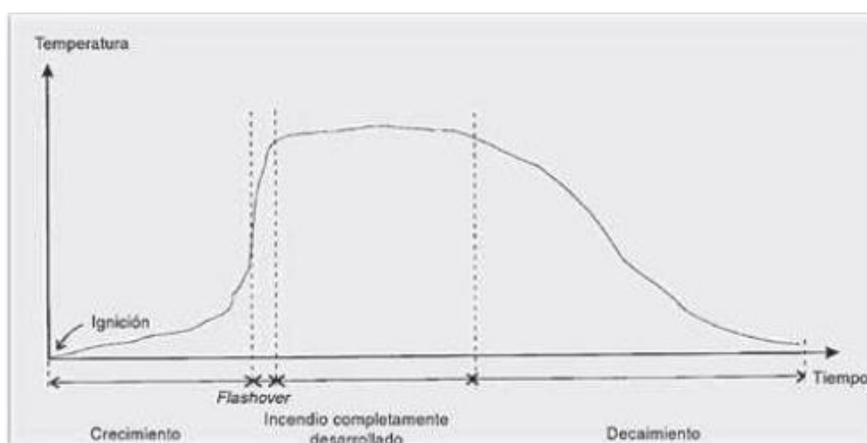
*Figura 2.2. Fases del Fuego.*

*Fuente: (Virgili Grau, 2007)*

### **2.1.3. FASES DEL INCENDIO**

- Fase Inicial o encendido: se produce la reacción química y alcanzan temperaturas hasta 300°C generando humo.(Albornoz et al., 2016)
- Fase de incremento de temperatura: existe un incremento de temperatura brusco alcanzando los 700°C, la energía calórica es mayor y alcanza materiales cercanos, incluida la estructura la cual comienza a debilitarse. Al final de esta fase las paredes pueden alcanzar una temperatura de ignición propagando el incendio conduciendo a la fase de libre combustión.
- Fase Latente: se genera cuando no hay libre disposición de aire, existe una acumulación de calor, humos y gases, que al existir un ingreso de aire puede generarse una onda expansiva.

- Fase de libre combustión: cuando existe disposición de aire esta fase puede iniciar de manera súbita, provocando la explosión por flujo reverso. Supera temperaturas de 800°C, con alta presencia de llamas y productos de la combustión y propagación. La energía calórica sigue siendo mayor lo que ocasiona un notable debilitamiento de la estructura.
- Fase de decaimiento: el combustible se termina por lo que el ritmo de la combustión disminuye, se apaga y existe una gran emisión de cantidad de gases. La estructura puede estar o entrar a estado de colapso. (Albornoz et al., 2016)



*Figura 2.3. Fases del Incendio.*

*Fuente: (Alvear et al., 2014)*

#### **2.1.4. CLASIFICACIÓN DE INCENDIOS**

Según la Norma Técnica Ecuatoriana NTE INEN 802-1, los incendios se clasifican en:

- Clase A: son generados por materiales combustibles comunes como tela papeles, madera, caucho y plásticos.
- Clase B: son producidos por líquidos inflamables, líquidos combustibles, grasas de petróleo, pintura y ciertos disolventes.

- Clase C: abarcan equipos eléctricos energizados.
- Clase D: originados por la presencia de metales combustibles como magnesio, titanio, circonio, sodio, litio y potasio.
- Clase K: son incendios que se generan por electrodomésticos que usan combustible para cocinar.

### 2.1.5. CURVA DE FUEGO ESTÁNDAR

Cuando se analizan elementos constructivos que son sometidos a altas temperaturas se recomienda usar curvas nominales que representen el fuego mediante la relación temperatura-tiempo. (Covarrubias Navarro & Ruvalcaba Ayala, 2015)

Entre las curvas que se utilizan en este tipo de estudios están las propuestas en el ASTM E119 e ISO 834, sirven para analizar la resistencia de elementos estructurales expuestos a altas temperaturas; la curva de la ASTM E119 es generalmente utilizada en Estados Unidos, mientras que la del ISO 834 es usada en Europa y Latinoamérica. En la siguiente gráfica se puede observar que no existe variación entre ello. (Castro & Sánchez, 2019)

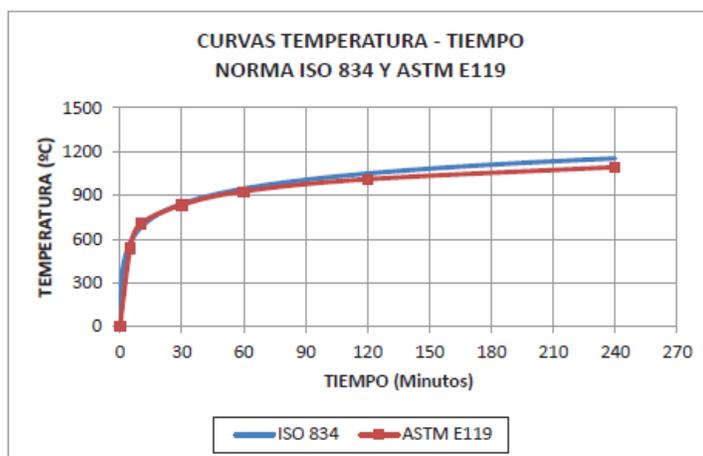


Figura 2.4. Curva normalizada temperatura-tiempo.

Fuente:(Castro & Sánchez, 2019)

## 2.1.6. CRITERIOS DEL DISEÑO CONTRA INCENDIOS

La curva normalizada según la norma ISO 834 en la que se establece una relación temperatura-tiempo, sirve como base teórica para el desarrollo de los criterios de diseño para la norma de construcción de diferentes países y de esta manera determinar la resistencia al fuego, que es medida como "Tiempo de Resistencia". (Virgili Grau, 2007)

### 2.1.6.1. Norma Ecuatoriana

El Código de Práctica Ecuatoriano CPE INEN 5 Parte 8 – Protección contra incendios, clasifica los elementos estructurales de acuerdo a la resistencia al fuego en base a la temperatura y tiempo.

TIPO No.	Tiempo en horas Resistencia mínima contra un incendio normal	Clase de incendio	
		Carga de fuego en kcal/m <sup>2</sup>	Clase de incendio
1	6	1 100 000 o más	Muy alto
2	4	550 000 a 1 100 000	Alto
3	2	275 000 a 550 000	Medio
4	1	menos de 275 000	Bajo
5	1/2	-----	Muy bajo

*Figura 2.5. Tiempo de Resistencia al fuego - Norma Ecuatoriana.*

*Fuente: (CPE INEN 5 Parte 8, 2016)*

### 2.1.6.2. Norma Brasileña

En la norma NBR 14432 "Requisitos de resistencia al fuego de los elementos constructivos-Procedimiento", tabla A.1, se detalla el tiempo de resistencia al fuego de acuerdo al tipo de ocupación y altura de la estructura.

Grupo	Ocupación/Usos	División	Profundidad del subsuelo		Altura del edificio				
			Clase S <sub>2</sub> h <sub>s</sub> > 10 m	Clase S <sub>1</sub> h <sub>s</sub> ≤ 10 m	Clase P <sub>1</sub> , h ≤ 6 m	Clase P <sub>2</sub> 6 m < h ≤ 12 m	Clase P <sub>3</sub> 12 m < h ≤ 23 m	Clase P <sub>4</sub> 23 m < h ≤ 30 m	Clase P <sub>5</sub> h > 30 m
A	Residencial	A-1 a A-3	90	60 (30)	30	30	60	90	120
B	Servicios de hospedaje	B-1 y B-2	90	60	30	60 (30)	60	90	120
C	Comercios minoristas	C1 a C-3	90	60	60 (30)	60 (30)	60	90	120
D	Servicios profesionales, personales y técnicos	D-1 a D-3	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
E	Educación y cultura física	E-1 a E-6	90	60 (30)	30	30	60	90	120
F	Locales de reunión destinados al público	F-1, F-2, F-5, F-6 y F-8	90	60	60 (30)	60	60	90	120
G	Servicios automotores	G-1 y G-2 no abiertos lateralmente y G-3 a G-5	90	60 (30)	30	60 (30)	60	90	120
		G-1 y G-2 abiertos lateralmente	90	60 (30)	30	30	30	30	60
H	Servicios de salud e institucionales	H1 a H-5	90	60	30	60	60	90	120
I	Industrial	I-1	90	60 (30)	30	30	60	90	120
		I-2	120	90	60 (30)	60 (30)	90 (60)	120 (90)	120
J	Depósitos	J-1	90	60 (30)	30	30	30	30	60
		J-2	120	90	60	60	90 (60)	120 (90)	120

Figura 2.6. Tiempo de Resistencia al fuego [min] - Norma Brasileña.

Fuente: (ABNT NBR 14432, 2000)

### 2.1.6.3. Norma Europea

El Eurocódigo es la norma más utilizada, debido a que es una de las más completas y abarca mayor cantidad de aspectos importantes para el diseño de elementos contra incendios. Por ejemplo, en el Eurocódigo 3 Parte 2 contiene los detalles del diseño de vigas metálicas, el Eurocódigo 2 Parte 2 y Eurocódigo 4 Parte 2 tienen el estudio de estructuras de concreto, estructuras de acero mixtas, todas estas cuando son sometidas a altas temperaturas.

## 2.2. MORTERO

### 2.2.1. DEFINICIÓN

De manera general, el mortero es una mezcla homogénea de uno o varios aglomerantes, que puede ser cemento portland u otros cementantes con áridos o

agregado fino y agua; además, a veces se añade aditivos. La proporción de estos componentes estará en función del uso que se le vaya a dar al mortero, pero al mismo tiempo que permita la trabajabilidad de la mezcla cuando está fresca y presente propiedades físicas y mecánicas aceptables, después de su fragua y endurecimiento (Ortega, 2001). Al momento de endurecerse, se busca que tenga buena adherencia y resistencia a la compresión.

## **2.2.2. EVOLUCIÓN HISTÓRICA DEL MORTERO**

Para hablar sobre el origen del mortero se debe suponer que las funciones básicas de los componentes (aglomerante y áridos) no se encontraban bien definidas y de esta manera pudieron desarrollarse variedad de materiales compuestos, con mayor o menor grado de capacidad de resistencia a la compresión (Alejandre Sánchez, 2002).

Los usos constructivos básicos del mortero, que se le daba en la antigüedad, no han variado sustancialmente respecto al que tienen en la actualidad. En la técnica constructiva los morteros, han sido usado como material de unión para mampuestos en obras de fábrica, como revestimiento para protección y decoración, e incluso como impermeabilizante.

### **2.2.2.1. Morteros en la antigüedad**

- Morteros Neolíticos: orígenes de la cal

Hace 6000 años en la villa neolítica de Çatal Hüyük (Turquía), se usó un mortero para la elaboración de paredes de tierra, que tenían una coloración negra, rico en cenizas y restos de huesos, debido a que no contaban aún con un verdadero aglomerante (Alejandre Sánchez, 2002). Tanto las paredes como los pisos estaban recubiertos con una mezcla de cal pintada de rojo. Estos podrían ser los primeros morteros fabricados a base de materiales que abundaban en la naturaleza.

Uno de los primeros morteros de cal descubierto data hace 7000 años en Jericó, su uso fue únicamente como mortero de revestimiento. Sin embargo, se descubrió la aplicación de los morteros de cal para la ejecución de pavimentos, estos fueron encontrados en la cultura neolítica de Jericó y también en Nevali Çori (Turquía) hace 10000 años.

- Morteros egipcios: el dominio del yeso

La cultura egipcia fue la primera en usar el yeso cocido para la construcción de la pirámide de Keops, la cual fue ejecutada en torno a 2500 a. C (Schoch & McNally, 2008). Los egipcios manejaban mucho este material y le daban varios fines constructivos como material de unión o ligamento entre los grandes bloques de piedra, como revestimiento y como material decorativo. El proceso de fabricación dependía del uso que se le daría.

La cal que se encontraba en los morteros para unión parecía ser una impureza existente en la piedra de yeso más que un componente propio del material (Ortega, 2001).

- Morteros griegos: el comienzo de la adición de puzolanas

Fueron los griegos quienes emplearon propiamente los morteros de cal en la construcción, empleando variedades de morteros: morteros de cal y arena fina, en unos añadían yeso y polvo de mármol y en otros agregaban aditivos como tierras de santorín o tejo triturado.

En su proceso de fabricación introdujeron el sistema de aplicación en multicapa para que el endurecimiento fuese más efectivo, y se implementó puzolanas naturales (ceniza volcánica), dando lugar a otra variedad de mortero.

- Morteros romanos: El dominio de los morteros de cal

A finales del siglo II o inicios del siglo I a. C se emplearon los morteros de cal, pero con una técnica de fabricación llamada “opus caementium”; esto constituía mortero de cal, árido y puzolanas (Ortega, 2001). Estos morteros contaban con una mayor resistencia debido a varios caracteres, uno de ellos sería la técnica de fabricación, la cual incluía una compresión con pilotes de la masa para eliminar los vacíos de aire y poros de agua.

Esta época fue donde los morteros de cal tuvieron dominio, ya que los Romanos conocían del yeso, pero prefirieron darle protagonismo a la cal.

#### **2.2.2.2. Morteros en la edad media**

Con el declive del Imperio Romano, los procesos de fabricación de los morteros de cal se fueron diversificando y sus propiedades variaban según el fin constructivo.

En la edad media se detecta una reducción de la cal y su mezcla con tierra en este tipo de materiales; no obstante, se genera una mayor elaboración en las técnicas constructivas.

Desde el siglo XIV predominó en la construcción el uso de la piedra, por lo que las técnicas de elaboración del mortero tuvieron un estancamiento. El mortero tuvo un papel importante en el siglo XVII y XVIII, pero no de manera constructiva sino simplemente como un complemento a escenografías arquitectónicas.

En el siglo XVIII se calcina calizas impuras con una proporción importante de arcilla, obteniendo un ligante hidráulico que da paso a los morteros hidráulicos, permitiendo un fraguado en presencia de agua (Ortega, 2001). La cantidad de arcilla, la temperatura y tiempo de cocción son los parámetros que determinaban si eran más o menos hidráulicos.

### **2.2.2.3. Morteros modernos**

Las cales hidráulicas contienen elevadas cantidades de óxido de calcio, por lo cual se deben apagar en presencia de agua, pero evitando una hidratación excesiva de los silicatos cálcicos. Estas cales son intermedias entre las cales hidratadas y el cemento portland actual.

A partir del siglo XIX hasta la actualidad, los procesos de fabricación del cemento han evolucionado. En 1818, Vicat propone la fabricación del cemento por medio de calizas y arcillas dosificadas en proporciones que estuvieran en función del uso que se le fuera a dar, este sistema orientó al ámbito constructivo a reemplazar la cal por cemento portland. En 1824, el cemento portland es patentado por James Parker y Joseph Aspdin. Las técnicas de producción del cemento no han variado mucho con las de la actualidad, sin embargo, desde el siglo XX se han realizado varias investigaciones sobre este material para mejorar sus propiedades y que se adapten a las diferentes condiciones del medio ambiente (AFAM, 2003).

### **2.2.3. TIPOS Y USOS DE MORTERO**

De manera general, se puede decir que son dos grupos: morteros aéreos y morteros hidráulicos.

Los morteros secos se endurecen cuando filtra el agua por secado al aire y tienen un fraguado lento debido al proceso de carbonatación. Los morteros hidráulicos en cambio al ser una mezcla de cal, arcilla calcinada, entre otros, se obtiene un mortero que endurece bajo el agua igual o más que el aéreo, que está constituido por cal y arena; sucede que entre la cal y la arcilla se produce una reacción particular (Guzmán, 2001).

Sin duda este material debe cumplir con unos requisitos mínimos de funcionalidad que garanticen la estabilidad de los elementos estructurales o mampostería estructural

y que sean compatibles con los materiales presentes, donde puede ser mortero de pega o mortero de relleno. Aunque hay otros morteros que no desempeñan una función estructural, sino que son usados como recubrimientos o decorativos (Gutiérrez de López, 2003).

### 2.2.3.1. Morteros de pega

Estos morteros deben tener características especiales que cumplan la norma NTE INEN 0247 (ASTM C207). Para que el cemento se hidrate correctamente, debe poseer una buena plasticidad, consistencia; además asegurar una buena adherencia con las piezas de mampostería (NEC-SE-MP,2014).

Según la norma NEC-SE-MP, la dosificación de estos morteros se indica en la siguiente tabla y se relaciona con la resistencia mínima a compresión.

Tipo mortero	de	Resistencia mínima compresión días (MPa)	a 28	Composición en partes por volumen		
				Cemento	Cal	Arena
M20		20.0		1	-	2.5
M15		15.0		1	-	3.0
				1	0.5	4.0
M10		10.0		1	-	4.0
				1	0.5	5.0
M5		5.0		1	-	6.0
				1	1.0	7.0
M2.5		2.5		1	-	7.0
				1	2.0	9.0

*Figura 2.2.1. Tipos de mortero, dosificación y resistencia mínima compresión a los 28 días.*

*Fuente: NEC-SE-MP,2014.*

- La cal que se utilice para este tipo de mezcla será la cal hidratada y se debe comprobar que no altere ninguna de las propiedades del mortero.
- Los agregados deben cumplir la norma NTE INEN 2536 (ASTM C144) y no presentar materiales contaminantes que alteren las propiedades del mortero.
- El agua no debe contener elementos que perjudiquen el comportamiento del mortero.

### 2.2.3.2. Morteros de relleno

Los morteros de relleno son empleados para penetrar entre los espacios de los elementos de mampostería, para esto debe contar con una buena consistencia y fluidez cumpliendo la norma ASTM C476.

Según la norma NEC-SE-MP, los componentes para la dosificación se basarán en ensayos previos de laboratorio o en prácticas de obra. Estos morteros se clasifican en función de la dosificación.

Tipo de mortero	Cemento hidráulico	Agregados / cemento			
		Fino		Grueso (tamaño < 10 mm)	
		Min.	Máx.	Min.	Máx.
Fino	1	2.25	3.5	-	-
Grueso	1	2.25	3.0	1	2

*Figura 2.2.2. Clasificación y dosificación por volumen de mortero de relleno.*

*Fuente: NEC-SE-MP,2014.*

- La cantidad de cal que contiene estos morteros es máxima del 10 % del volumen del cemento y deberá cumplir la norma NTE INEN 0247 (ASTM C207).
- Los agregados tienen que estar libres de materiales contaminantes y cumplir la norma ASTM C404.

- El agua no debe contener sustancias que alteren la mezcla para el mortero de relleno.

### **2.2.3.3. Morteros de recubrimiento**

Este tipo de morteros no requiere cumplir ninguna norma específica ya que su objetivo principal es decorativo, es decir, uniformizar superficies para que estén listas para aplicar pintura. Pero sí cierta resistencia mínima a la acción de la interperie.

## **2.2.4. PROPIEDADES DE LOS MORTEROS**

El mortero debe cumplir una serie de propiedades específicas que dependen del uso que se le vaya a dar. Las propiedades del mortero serán similares a las de una piedra artificial debido a su gran parecido, pero durante el proceso de elaboración, éste es una mezcla plástica que debe ser manejable y además que garantice eficiencia.

### **2.2.4.1. Estado plástico**

- **Trabajabilidad:** Describe cuán fácil de manipular es la mezcla, es decir, que se pueda manejar la mezcla con el mínimo esfuerzo y que genere eficiencia al proceso. La trabajabilidad está relacionada con varias propiedades, como la consistencia de la mezcla, la cohesión y adherencia. A pesar de que la trabajabilidad esté determinada tanto por la granulometría de los áridos y la dosificación de los compuestos, el principal factor es la cantidad de agua, de ahí que se considera la relación agua/cemento (Gutiérrez de López, 2003).

Se realiza el ensayo de fluidez para determinar la trabajabilidad del mortero que se describe en la norma NTE INEN 2 502:2009.

- **Retención de agua:** Es la propiedad que indica la habilidad del mortero para mantener su plasticidad, la cual se puede mejorar añadiendo cal o contenido de aire, o aumentando la cantidad de finos en la granulometría de la arena dentro de los límites establecidos en la norma, o incorporando aditivos plastificantes.

Al mejorar la capacidad de retención de agua la resistencia final a compresión del mortero aumenta, debido a que la velocidad de endurecimiento se acelera. (Gutiérrez de López, 2003)

- Velocidad de endurecimiento: El endurecimiento tiene conexión directa con las características de fraguado (grado de hidratación), así como lo señala la resistencia a la deformación (2010, NTE INEN 2 518). Un endurecimiento anticipado de la mezcla de mortero sería perjudicial para su uso. El mortero se va endureciendo a medida que va perdiendo agua y también depende de las condiciones ambientales (Gutiérrez de López, 2003).

#### **2.2.4.2. Estado endurecido**

- Retracción: Esta se produce principalmente por una reacción química en la pasta de cemento y es mayor cuando el mortero contiene alta cantidad de cemento y el agua tiende a evaporarse, provocando tensiones internas en el mortero. Para evitar la retracción y que se produzcan agrietamientos se recomienda utilizar arenas con textura rugosa (Gutiérrez de López, 2003).
- Adherencia: Es la capacidad que posee el mortero para absorber las tensiones normales y tangenciales a la superficie que une con la estructura, es decir, responder de manera conjunta con la estructura ante sollicitaciones de carga. La adherencia depende también de las características de la superficie y naturaleza del material al que se va a adherir el mortero (Gutiérrez de López, 2003).
- Extensibilidad y flujo plástico: La extensibilidad es la máxima deformación unitaria que se produce bajo la acción de fuerzas de tracción. El flujo plástico otorga flexibilidad a la estructura, permitiendo movimientos pequeños sin generar aberturas apreciables en las juntas (2010, NTE INEN 2 518).

- Resistencia a la compresión: Esta propiedad es utilizada como parámetro principal pero no único para escoger el tipo de mortero que se va a utilizar, ya que debe poseer la resistencia necesaria para soportar cargas altas y sucesivas a las que puede estar sujeto. La resistencia a compresión depende de la cantidad de cemento y la relación agua/cemento (2010, NTE INEN 2 518).

Para el diseño de morteros de alta resistencia, con un mismo cemento y tipo de agregado, el mortero que contenga mayor cantidad de cemento será el de mayor resistencia y mayor impermeabilidad. La granulometría de los áridos es importante ya que entre más fina sea la arena se obtendrá un mortero más denso que uno hecho con arena gruesa considerando la misma cantidad de cemento (Gutiérrez de López, 2003).

Para determinar la resistencia del mortero en laboratorio se la mide en cubos de 5 cm de arista, además se puede determinar la compatibilidad de los componentes del mortero. Cuando se quiere hacer el ensayo en obra, se debe cumplir los requerimientos de la norma ASTM C780 que usa cubos de 5 cm de arista o pequeños cilindros (2010, NTE INEN 2 518).

- Durabilidad: La durabilidad es la resistencia ante agentes externos como descenso de temperatura, infiltración de agua, retracción al secado, desgaste de abrasión, choques térmicos o agentes corrosivos (Gutiérrez de López, 2003).

La durabilidad puede ser muy afectada por un reemplado del mortero, que consiste en aumentar agua para recuperar la consistencia de la pasta antes del fraguado; o cuando la cantidad de arena es excesiva, así como usar unidades de mampostería de alta absorción (2010, NTE INEN 2 518).

### **2.3. HORMIGÓN**

El concreto fue utilizado en la tercera centuria antes de Cristo, era un material que

estaba compuesto por cal y ceniza, pasa por un periodo de olvido hasta el siglo XVIII, que es usado para la construcción en Inglaterra, donde se descubre que la mezcla de cal calcinada y arcilla dan creación a un conglomerante que es capaz de resistir el agua. En 1824, Joseph Aspdin elaboró el cemento con arcilla y caliza y encuentro una semejanza entre el concreto y la piedra de la Isla Portland, lo que se le asigna el nombre de cemento portland. (Harmsen, 2005)

Debido a la implementación de los hornos rotatorios de calcinación en 1909 gracias a Thomas Edison, se pudo realizar una producción en grandes cantidades de este material. El cual hasta la actualidad tiene una diversa calificación dependiendo de los requerimientos solicitados. (Holcim, 2016)

El hormigón es un material que tiene una consistencia dura, que resulta al mezclar cemento, agregado grueso (ripio), agregado fino (arena), agua y aire; tiene una gran similitud a la piedra, pero la diferencia es que el concreto puede adquirir forma y dimensión con un encofrado. El cemento y el agua realizan una reacción química que hace que todo se convierta en una masa sólida. Dependiendo de la cantidad que se ponga de cada uno de los elementos y también del tiempo de curado, se pueden obtener distintas resistencias. (Ortega García, 2014)

Los compuestos del hormigón tienen diferentes clases o tipos, que son utilizados según su utilidad.

### **2.3.1. CEMENTO**

Según la Norma Técnica Ecuatoriana 1505 (2017), menciona varios tipos de cemento los cuales son portland, hidráulicos, hidráulicos compuestos e hidráulicos expansivos.

**Cemento Portland:** Material de color gris que tiene como base silicato de calcio y

aluminio. Los compuestos usados como materia prima para su fabricación son: sílice ( $\text{SiO}_2$ ), cal ( $\text{CaO}$ ), alúmina ( $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) y óxido de hierro ( $\text{Fe}_2\text{O}_3$ ), el cual presenta la siguiente clasificación (Gutiérrez De López, 2003a; NILSON, 2001; NTE INEN 152, 2010)

- Tipo I: Cemento común utilizado para todo tipo de obras que no tengan requerimiento de propiedades especiales.
- Tipo IA: Con incorporación de aire.
- Tipo II: Menor desprendimiento de calor de hidratación y resistencia moderada a los sulfatos (exposición a suelos o aguas subterráneas con índices moderados de concentración de sulfatos).
- Tipo IIA: Con incorporación de aire.
- Tipo III: Cemento que presenta una alta resistencia inicial o edades tempranas (una semana).
- Tipo IIIA: Con incorporación de aire.
- Tipo IV: Posee un desprendimiento de calor bajo (hormigón masa).
- Tipo V: Altamente resistente a la acción de los sulfatos.(Gutiérrez De López, 2003a; Kosmatka, 2004; NTE INEN 152, 2010)

**Cementos hidráulicos:** La denominación de cementos hidráulicos está dada por la reacción química que tienen con el agua. Esta permite un correcto endurecimiento y fraguado del cemento, se los ha nombrado de acuerdo a su comportamiento. (Kosmatka, 2004; NTE INEN 2380:2011, 2002)

- GU: Cemento utilizado para todo tipo de construcción, donde no se requiera tener características especiales del mismo.
- HE: similar al Cemento Portland tipo III, obtiene alta resistencia a edades muy tempranas (menor a una semana)
- MS: Posee una resistencia moderada a los sulfatos, se debe garantizar una baja relación entre agua – materiales cementantes para obtener un concreto tipo MS.

- HS: Alta resistencia a los sulfatos, utilizado en contacto con el suelo o aguas subterráneas donde existen altas concentraciones de sulfato.
- MH: Cemento con calor de hidratación moderado, reduce la subida de temperatura evitando problemas de agrietamiento.
- LH: Minimiza la cantidad de calor generado debido a la hidratación, tiene un uso similar al Cemento Portland Tipo IV y usado en estructuras de concreto masivo.(Kosmatka, 2004; NTE INEN 2380:2011, 2002)

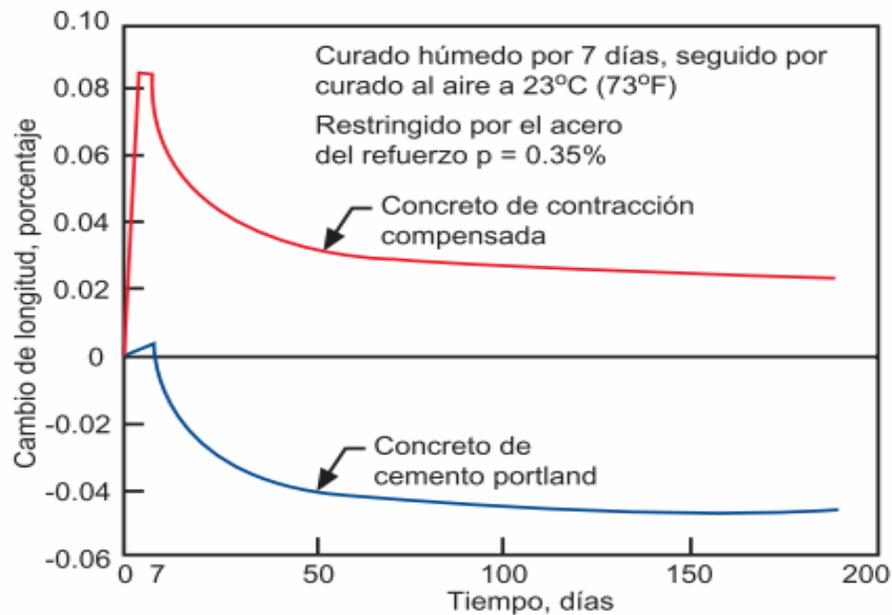
**Cementos Hidráulicos Compuestos:** Son similares a los cementos Portland, pero dependiendo del tipo y necesidad se añade escoria, puzolana o temario. Deben ensayarse antes de su uso para comprobar su resistencia, durabilidad y los requerimientos necesarios.(Kosmatka, 2004; NTE INEN 490, 2011)

Tienen diferentes sub categorías dependiendo el uso especial, estos requerimientos están dados por la adición de sufijos A (aire incorporado), MS (moderada resistencia a los sulfatos), LH (calor de hidratación).(Kosmatka, 2004)

- IS: Cemento de escoria granulada de alto horno, la composición comprende entre 25 -70 % de contenido de escoria en la mezcla realizada con Clinker, esta puede ser por separado o molidas conjuntamente.
- IP: Este tipo de cemento se obtiene de la molienda de puzolana y Clinker, además presenta una coloración rojiza. El contenido de puzolana debe estar dentro del rango de 15% - 40%, tiene características similares al cemento Portland tipo I con la diferencia que a este se le puede dar características espaciales como adición de aire ente otras.
- IT: Cemento compuesto ternario. (Kosmatka, 2004; NTE INEN 490, 2011)

**Cementos Hidráulicos Expansivos:** Cemento (Tipo E-1) que, al terminar el periodo de fraguado, durante el inicio de su endurecimiento presenta una ligera expansión del mismo. Este tipo de cementos son usados para reducir esfuerzos de tracción, reducción de volumen debido a la contracción de secado, estabilizar las dimensiones de la estructura de concreto postensado.

- Tipo E-1(K): Este tipo está compuesto por cemento portland, sulfato de calcio, trisulfoaluminato tetracálcico ( $4\text{CaO} \cdot 3\text{Al}_2\text{O}_3 \cdot \text{SO}_3$ ) y cal.
- Tipo E-1(M): Compuesto en su mayoría contiene cemento de aluminio de calcio, sulfato de calcio y cemento Portland.
- Tipo E-1(S): El cemento portland usando para esta variedad tiene gran cantidad de aluminato tricálcico y sulfato de calcio. (ASTM C 845, 1996)



*Figura 2.2.3 Cambios de longitud de un cemento de contracción compensada, de concreto conteniendo cemento tipo E-1 (S) y de concreto conteniendo cemento portland tipo I (Pleifer y Perenchio 1973)*

*Fuente: (Kosmatka, 2004)*

### 2.3.2. AGUA

El agua es de los principales elementos para la obtención del concreto, ya que permite al cemento desarrollar su capacidad litigante. El agua dentro de esta mezcla cumple con diferentes objetivos:

- Hidratación del cemento.
- Lubricar a los agregados y así tener una fluidez en la pasta.

El agua sobrante por exceso o por una mala dosificación queda dentro de la mezcla y durante el proceso de fraguado crea porosidad, lo cual genera una reducción en la resistencia o se percola por el encofrado y arrastra consigo al cemento, también disminuye la resistencia. El agua que se emplea para esta mezcla es la de consumo humano, libre de diversas sustancias y materia orgánica, existen casos en los cuales el agua no es potable o tiene una calidad dudosa; para esto se debe hacer cubos de mortero que a sus 7 y 28 días deberán obtener 85% - 90% de la resistencia esperada en óptimas condiciones para usar dicha agua. (Gutiérrez De López, 2003a; Kosmatka, 2004)

Existen diversas tolerancias permitidas que se puede encontrar en el agua como muestra la figura a continuación:

<b>IMPUREZAS</b>	<b>MAXIMA CONCENTRACION TOLERADA</b>
Carbonatos de sodio y de potasio	1.000 ppm
Cloruro de sodio	20.000 ppm
Cloruro como Cl (concreto preesforzado)	500 ppm
Cloruro como Cl (concreto húmedo o con elemento de aluminio, metales similares o galvanizados)	1.000 ppm
Sulfato de sodio	10.000 ppm
Sulfato como SO <sub>4</sub>	3.000 ppm
Carbonatos de calcio y magnesio, como ión bicarbonato	400 ppm
Cloruro de magnesio	40.000 ppm
Sulfato de magnesio	25.000 ppm
Cloruro de calcio (por peso de cemento en el concreto)	2%
Sales de hierro	40.000 ppm
Yodato, fosfato, arsenato y borato de sodio	500 ppm
Sulfito de sodio	100 ppm
Acido sulfúrico y ácido clorhídrico	10.000 ppm
Ph	6 a 8
Hidróxido de sodio (por peso de cemento en el concreto)	0.5 %
Hidróxido de potasio (por peso del cemento en el concreto)	1.2 %
Azúcar	500 ppm
Partículas en suspensión	2.000 ppm
Aceite mineral (por peso del cemento en el concreto)	2%
Agua con algas	0
Materia orgánica	20 ppm
Agua de mar (concentración total de sales para concreto no reforzado)	35.000 ppm
Agua de mar para concreto reforzado o preesforzado	No recomendable

*Figura 2.2.4: Tolerancia de concentraciones de impurezas en el agua de mezcla.*

*Fuente: (Gutiérrez De López, 2003b)*

Existen varios tipos de agua como:

**Agua de mar:** Este tipo de agua por su alta concentración de sal (78% cloruro de sodio 15% cloruro y sulfato de magnesio), es utilizada con cementos que posean una alta resistencia a los sulfatos además de tener una relación baja agua–cemento. Esta se emplea en la fabricación de concretos que no necesiten un reforzamiento de acero ni concreto pretensado, por el riesgo de la corrosión de la armadura.(Kosmatka, 2004)

**Aguas Acidas:** La acidez del agua es medida por un valor de pH (concentración de iones de hidrogeno), valores inferiores a 7 representan acidez, superiores a 7 muestran alcalinidad e iguales a 7 es neutra. Cuando el pH es inferior a 3 se puede tener problemas con ácidos orgánicos como el ácido tánico que puede ocasionar una disminución en la resistencia del hormigón en altas cantidades.(Kosmatka, 2004)

**Aguas Alcalinas:** No existe una influencia significativa en la resistencia del hormigón, cuando se tiene concentraciones de hidróxido de sodio menores al 0.5% del peso del cemento y concentraciones menores al 1.2% de hidróxido de calcio del peso del cemento. Si se sobrepasa estos valores se presentan ligeras reducciones en la resistencia, por lo cual se considera un incremento de la reactividad álcali – agregado. (Kosmatka, 2004)

**Aguas de Enjuague:** Es la reutilización de agua empleada en diversas actividades como lavado de mezcladoras, entre otras. Este tipo de agua está sujeta a un proceso de desinfección y debe cumplir con estudios de alcalinidad, acidez, etc. para poder ser reutilizada. (Kosmatka, 2004)

**Aguas de Desechos Industriales:** Al usar el agua de desechos industriales como fábricas de pinturas, plantas químicas, etc. para la producción de hormigón, la resistencia baja entre el 10% – 15%. Esto se produce debido a que el agua contiene alrededor de 4000ppm sólidos totales.(Kosmatka, 2004)

**Aguas Negras:** Sin tratamiento este tipo de agua contiene entre 40ppm, lo cual se reduce a 20ppm o menos con un tratamiento básico. Esta concentración de sólidos totales no afecta de manera considerable la resistencia. (Kosmatka, 2004)

Otros factores a tomar en consideración que pueden afectar las propiedades del agua y por ende la fabricación de concreto son:

- Impurezas
- Contenido de azúcar
- Sedimentos
- Aceites
- Algas
- Uso de aditivos (Kosmatka, 2004)

### **2.3.3. AGREGADOS**

Los agregados son la parte más importante en el hormigón, ya que representan el 60%-75% del volumen total (70% - 85% de la masa). Estos actúan directamente sobre las propiedades del concreto como su endurecimiento, además también tienen incidencia en la parte económica y se clasifican en dos grupos áridos gruesos y finos. (Gutiérrez De López, 2003a; Kosmatka, 2004; NILSON, 2001)

#### **2.3.3.1. Áridos Gruesos**

Los agregados gruesos en partículas mayores a los 5mm, generalmente su tamaño está entre 9.5mm – 37.5mm y están conformados por piedra triturada o grava. Para obtener resistencias hasta 250 kg/cm<sup>2</sup> se recomienda usar el mayor tamaño de agregado grueso; para aumentar su resistencia se usa el diámetro mínimo de agregado grueso, con lo cual se garantiza tener una reducción de vacíos mejorando sus propiedades (Kosmatka, 2004).

Los áridos gruesos poseen las siguientes características principales:

- Tener una buena gradación para poder evitar problemas de segregación.
- Tener en cuenta el tamaño máximo a usar para la obtención de la resistencia solicitada.
- Tener una densidad entre  $2.3\text{g/cm}^3$  –  $2.9\text{g/cm}^3$ .
- Debe tener un máximo de 3% de contenido de partículas finas (arcilla y limos) (Gutiérrez De López, 2003a).

### 2.3.3.2. Árido Fino

La cantidad necesaria de árido fino está entre el 45% - 60% para obtener el volumen total de la mezcla (Kosmatka, 2004).

Las principales características que deberían tener los áridos finos son:

- Tener una buena gradación para obtener una mezcla más compacta
- El porcentaje de pasante de los tamices 50 y 100 afecta la exudación del concreto y a la vez su textura superficial. Para una superficie tersa, el pasante del tamiz 50 debe ser mayor al 15% y del tamiz 100 debe ser mayor al 3%
- Al tener arena en extremo gruesas se obtienen mezclas ásperas, cuando es muy fina se tiene segregación del agregado grueso.
- Módulo de finura entre 2.3 – 3.1
- Tener bajos niveles de materia orgánica para evitar problemas en el proceso de fraguado. (Kosmatka, 2004)

### 2.3.4. PROPIEDADES MECÁNICAS

**Compresión:** La compresión es la propiedad mecánica más importante del concreto, debido a esto la curva esfuerzo vs. deformación unitaria es de gran interés para evaluar su comportamiento. Esta curva se obtiene mediante pruebas de laboratorio, se realizan

cilindros generalmente de 30cm de altura x 15cm de diámetro.(NILSON, 2001)  
(Gutiérrez De López, 2003b)

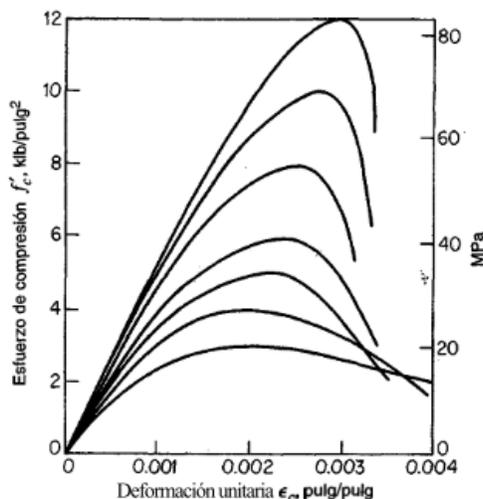


Figura 2.2.5: Curva esfuerzo – deformación

Fuente: (NILSON, 2001)

Los valores referenciales según la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-HM, para el esfuerzo de compresión ( $f'_c$ ) con su respectiva deformación unitaria ( $\epsilon$ ) se detallan a continuación:

- Hormigón normal  $\rightarrow f'_c = 21 \text{ MPa}$   
 $\epsilon = 0.002 - 0.003$
- Hormigón liviano  $\rightarrow f'_c = 35 \text{ MPa}$   
 $\epsilon = 0.003 - 0.0035$

**Módulo de Elasticidad:** Es la relación que existe entre el esfuerzo y la deformación unitaria situado en el rango elástico de la curva esfuerzo-deformación, también es la pendiente del tramo inicial de la curva y su expresión está dada por las siguientes ecuaciones (NEC SE HM)(NILSON, 2001) (Gutiérrez De López, 2003a):

Ecuación para deflexiones ante cargas estáticas y hormigón pretensado:

$$E_c = 1.15 * \sqrt[3]{E_a} * \sqrt{f'_c} \quad (1)$$

Donde:

$E_c$ : Módulo de elasticidad del hormigón (GPa)

$E_a$ : Módulo de elasticidad del agregado (GPa) (Disponibles en la tabla 11 NEC-SE-HM)

$f'_c$ : Resistencia a la compresión del hormigón (MPa)

Ecuación para hormigones de densidad normal, diseñados para acciones sísmicas basado en métodos de la NEC-SE-DS:

$$E_c = 4.7 * \sqrt{f'_c} \quad (2)$$

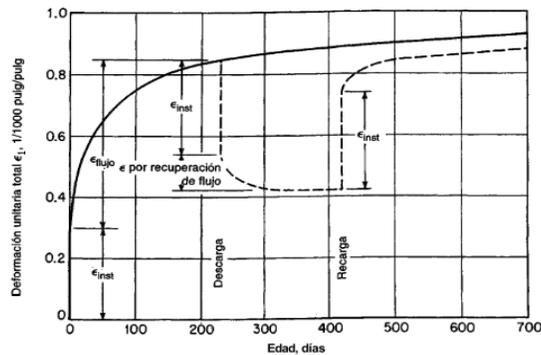
**Flujo Plástico:** Cuando el material está sometido a un esfuerzo o carga constante y su deformación es continua en el tiempo. Para poder estimar el coeficiente de flujo plástico se emplea la siguiente ecuación (NILSON, 2001):

$$C_{cu} = \frac{\varepsilon_{cu}}{\varepsilon_{ci}} \quad (3)$$

Donde:

$\varepsilon_{cu}$ : Es el valor asintótico final de la deformación unitaria adicional por flujo plástico

$\varepsilon_{ci}$ : Es la deformación unitaria inicial instantánea cuando la carga se aplica por primera vez.



*Figura 2.2.6: Curva Típica De Flujo Plástico (Concreto sometido a un esfuerzo de 4.14 MPa (600 psi))*

*Fuente: (NILSON, 2001)*

**Fatiga:** La resistencia para cargas cíclicas que produzcan un desgaste en el hormigón (fatiga), es menor a la su resistencia para cargas estáticas, esta resistencia corresponde entre un 50% - 60% de la resistencia a la compresión estática. La resistencia de la fatiga del concreto para estimar un valor debe considerar también los siguientes factores (NILSON, 2001):

- Humedad
- Edad del concreto
- Velocidad de aplicación de la carga

## 2.4. ACERO

El acero es uno de los avances importantes en el desarrollo de los metales aplicados a la construcción, su fabricación aparece de una aleación del hierro, en la actualidad el acero y el hierro alcanzan el 95% de producción de los metales. No se tiene una gran certeza desde cuando se empezó a dar uso al hierro, pero en Egipto se encontró instrumentos de acero que tenían una edad aproximadamente de 5000 años, después alrededor de los años 1000 a.C. se empieza a usar con más frecuencia para la elaboración de materiales militares para la guerra. (McCormac & Csernak, 2012)

El acero es una combinación de hierro y ciertas cantidades de carbono, incluyendo también otros elementos; al inicio el hierro era calentado con carbón vegetal donde entraron en contacto y después con algunos martillos se produjeron las espadas de Toledo y Damasco. Antes que se encontrara el proceso Bessemer, el producir elementos de acero tenían un costo significativo, pero al descubrir este proceso los costos de producción bajaron un 80%, lo que permitió producir en grandes cantidades. Este proceso fue usando hasta principios de este siglo y fue reemplazado por el proceso de solera abierta y el de oxígeno básico, el 1980 en Estados Unidos el acero ya fue el principal metal usado para la estructura de edificaciones.(McCormac & Csernak, 2012)

Los aceros son aleaciones de hierro y carbono, que además tienen pequeños porcentajes de magnesio, silicio, azufre y fósforo; el carbono es el que tiene un papel importante en el acero, ya que dependiendo de su cantidad van a tener las propiedades el acero y esta es una forma de clasificarlos:

- Bajo carbono: menor a 0.30%
- Medio carbono: 0.30 a 0.60%
- Alto carbono: superior a 0.60%
- Acero de herramientas: superior a 0.77%. (Maldonado Flores, 1996)

El acero estructural corresponde a la clasificación de bajo contenido de carbono, que tiene aproximadamente 0.2% de carbono, si existe un aumento en la concentración del carbono el acero aumenta su resistencia, pero disminuye su ductilidad, es decir mayor esfuerzo de fluencia y mayor esfuerzo último pero menor deformabilidad. (Gere & Goodno, 2013)

En el ámbito de la construcción el acero tiene una posición notable, ya que posee una combinación de resistencia mecánica, capacidad de trabajo, disponibilidad en el mercado y costo accesible. Es utilizado para la construcción de estructuras como

puentes y edificios; el diseñador debe asegurarse que el acero a utilizarse en obra cumpla con las principales propiedades mecánicas.

#### 2.4.1. PROPIEDADES MECÁNICAS

**Ductilidad:** Es la capacidad que posee el acero para deformarse, por ejemplo, esta es la propiedad que permite que una barra de acero pueda doblarse para formar un arco sin romperse; es decir, si el material está soportando cargas muy grandes, muestra distorsiones evidentes para que se realice una acción correctiva y evitar que se llegue a la fractura.

Para el cálculo de la ductilidad de un material que ha sido sometido a ensayos de tensión, se puede emplear el porcentaje de alargamiento o el porcentaje de reducción de área:

$$\text{Porcentaje de alargamiento} = \frac{L_1 - L_0}{L_0} * 100 \quad (4)$$

$L_0$ : longitud inicial calibrada

$L_1$ : longitud final entre marcas

$$\text{Porcentaje de reducción de área:} \frac{A_1 - A_0}{A_0} * 100 \quad (5)$$

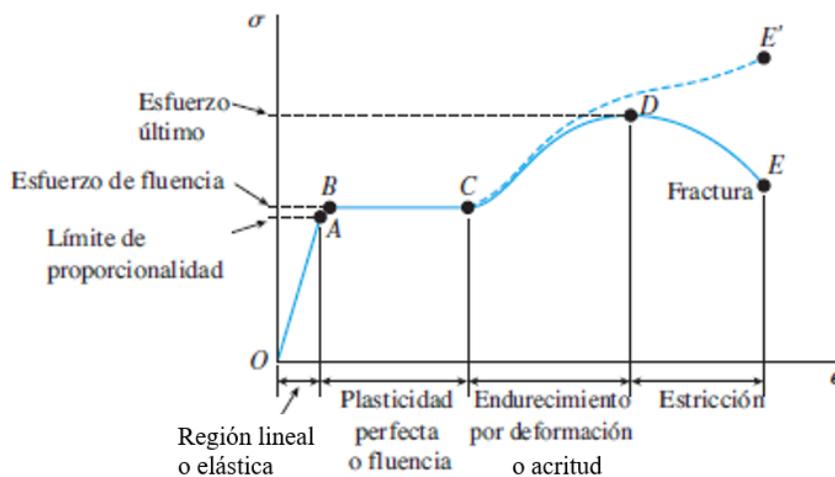
$A_0$ : área transversal inicial

$A_1$ : área final en la sección de fractura

En el acero estructural el porcentaje de alargamiento puede variar entre el 20-30% y el porcentaje de reducción de área suele ser casi el 50%. (Gere & Goodno, 2013)

**Elasticidad:** es la propiedad que permite que el material vuelva a sus dimensiones iniciales después de una descarga, algunos materiales como el acero, tienen un comportamiento elástico en la primera fase de cargas. La relación entre el esfuerzo y

la deformación unitaria es lineal  $\sigma = E\varepsilon$ , donde “E” es una constante y es conocida como módulo de elasticidad, que es la pendiente del diagrama de esfuerzo-deformación en la sección O-A. (Gere & Goodno, 2013)



*Figura 2.2.7: Diagrama esfuerzo-deformación para un acero estructural en tensión*

*Fuente:(Gere & Goodno, 2013)*

**Resistencia:** es la capacidad que posee un elemento o una estructura para soportar cargas; la resistencia de un material es también conocida como “esfuerzo”. En el caso de aceros al bajo carbono que son los aceros estructurales, se realiza un ensayo a tensión que da como resultado una gráfica de esfuerzo-deformación, la cual sirve para conocer las propiedades que posee el acero.(Gere & Goodno, 2013)

El punto B del diagrama es el punto de fluencia del acero, que es considerado como esfuerzo de fluencia, en el tramo B-C el material sufre una gran deformación, pero sin incremento de la fuerza de tensión, el material presenta un comportamiento perfectamente plástico. En la sección C-D se encuentra el esfuerzo último o resistencia última, que aparece después que el acero se endurezca por deformación, llamado zona de acritud, dando como resultado un esfuerzo mayor.(Gere & Goodno, 2013)

**Resiliencia:** es la cantidad de energía de deformación que absorbe el material cuando se esfuerza hasta el límite de proporcionalidad (Punto A  $\sigma_{lp}$  de la curva esfuerzo-deformación), es denominado módulo de resiliencia  $u_r$  y se calcula:

$$u_r = \frac{\sigma_{lp}^2}{2E} \quad (6)$$

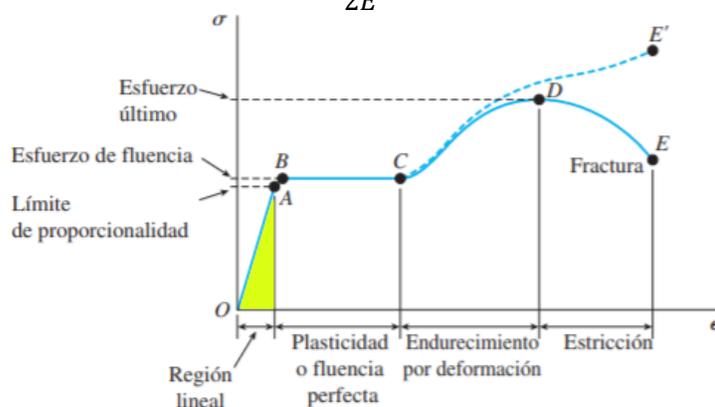


Figura 2.2.8: Representación gráfica de resiliencia.

Fuente:(Gere & Goodno, 2013)

Es decir, la resiliencia es la capacidad de absorber y liberar energía dentro del límite elástico, es el área bajo la curva de la región lineal.(Gere & Goodno, 2013)

**Tenacidad:** es la capacidad que posee el material para absorber energía sin fracturarse, se denomina como módulo de tenacidad  $u_v$ , es la cantidad de energía de deformación hasta el punto de fractura, corresponde a toda el área bajo la curva de esfuerzo-deformación. Cuanto más grande es el módulo de tenacidad será mayor la capacidad de absorber energía sin presentar fallas.(Gere & Goodno, 2013)

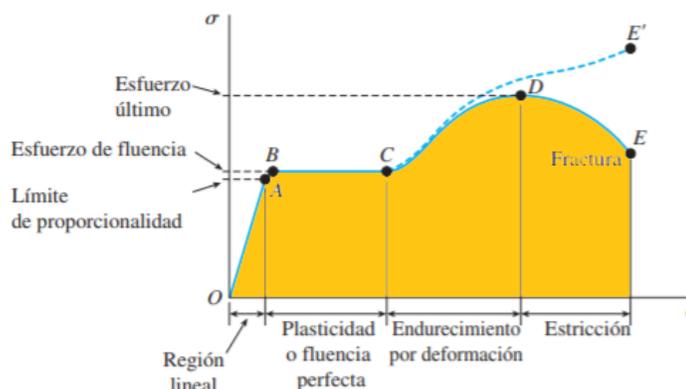


Figura 2.2.9 Representación gráfica de tenacidad.

Fuente: (Gere & Goodno, 2013)

## 2.5. ESTADO DEL ARTE

### 2.5.1. MORTERO

El incremento del área de fisuración y la variación de la resistencia a compresión del mortero, se ha tornado en un asunto de interés mundial en los últimos tiempos, ya que constituyen uno de los síntomas de la patología del hormigón de mayor adversidad y ocurrencia en toda obra, por la incidencia de fallas cada vez mayores que provocan intervenciones correctivas con altos costos económicos.

En este contexto, se ha hecho una revisión de la información disponible respecto al comportamiento del mortero, después de ser sometido a altas temperaturas. Se puede destacar los siguientes trabajos:

**“ESTUDIO EN LABORATORIO DE LOS EFECTOS DE ALTAS TEMPERATURAS EN EL HORMIGÓN ARMADO: RESISTENCIA A FLEXIÓN.”** De autoría de Villacís, M. & Ortiz, A. (2002) en la Escuela Politécnica Nacional de Quito. Han llegado a la conclusión de que se presentan fisuras en el área de refuerzo transversal en las vigas estudiadas, luego de haber sido expuestas a 300°C durante un tiempo de exposición de 12 horas. Existe un aumento de fisuras en el área de

refuerzo longitudinal y refuerzo transversal cuando se alcanzan temperaturas de 600°C y 900°C. (Villacís, M. & Ortíz, A.,2002)

**“EMPLEO DE ULTRASONIDOS Y ESCLEROMETRÍA EN EL DIAGNÓSTICO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN AFECTADAS POR ELEVADAS TEMPERATURAS”**, de autoría de Ercolani, G. (2007). El autor plantea realizar ensayos no destructivos a estructuras que hayan sido sometidas a temperaturas elevadas y de esa manera poder cuantificar el deterioro estructural; siendo muy útil cuando no es posible extraer núcleos por seguridad propia de la estructura.

En este estudio se ensayaron una serie de probetas de hormigón, con 3 tipos de dosificaciones sometidas a diferentes temperaturas (desde temperatura ambiente, hasta 750 °C durante un tiempo de exposición de 1 hora) para luego enfriarlas de varias maneras, al aire libre o rociadas con agua.

Se realizó la determinación de la Velocidad de Propagación de Impulsos Ultrasónicos, establecieron el Índice de Rebote con un Esclerómetro, de cada una de las probetas, antes y después de someterlas a las condiciones explicadas anteriormente; de esta manera estimar la resistencia del hormigón mediante ensayos de rotura a compresión de las probetas y contrastando con los resultados que obtuvieron de los ensayos no destructivos (END).

Así también, se hizo un cambio con el tiempo de exposición de las probetas debido a que aquellos que tenían la mayor relación agua/cemento y eran expuestas a 750 °C, se rompían al momento de sacarlas del horno, lo cual no dejaba espécimen para realizar cualquier ensayo, por lo que disminuyeron el tiempo de 90 a 60 minutos de exposición.

En este ensayo se pudo notar un cambio de color de las probetas después de haber sido sometidas a altas temperaturas. En las probetas que fueron sometidas a 250 °C

no se notaron fisuras, su color era beige pálido y no tuvo alteraciones internas, a 500 °C su coloración fue gris y las que estuvieron a 750 °C un gris más claro que el anterior ciclo y en el interior de las probetas de estos últimos dos ciclos, los agregados también presentaron cambios en su coloración.

De acuerdo con los resultados, el autor concluye que el tipo de enfriamiento influye mucho en la presencia de fisuras, ya que cuando las probetas salen del horno tienen una determinada área de fisuración, pero al ser enfriadas con agua, las fisuras aumentan.

Los resultados con el método esclerométrico IE indican que, hasta los 250 °C, la dureza superficial no sufre ningún cambio, independiente del tipo de dosificación y enfriamiento. En las probetas enfriadas al aire se obtuvo un aumento del 10%, esta variación se puede decir que se debe al hecho que, cuando el hormigón está dentro del horno pierde su humedad superficial, por lo que ficticiamente su dureza superficial aumenta y aparentemente sus propiedades mecánicas mejoran. Pero cuando la temperatura a la que se sometieron las probetas es mayor a 250 °C, la dureza superficial desciende radicalmente con cierta variación que depende de la relación agua/cemento y el tipo de enfriamiento.

El método de velocidad de propagación ultrasónica (VU) indicó un descenso brusco y lineal de la VU en función de la temperatura a la que fueron sometidas las probetas. El descenso es menor cuando las probetas son enfriadas al aire y no con agua. No hay resultados para el ciclo de 750 °C debido a que presentaban demasiadas fisuras y hacían imposible este ensayo.

En este estudio consideran que la VU se acerca más a la realidad que el IE, ya que solo considera lo que pasa en la superficie.

Hacen una relación entre la Velocidad de Propagación ultrasónica y la resistencia a compresión del hormigón, en donde se nota que, al incrementar la velocidad, la resistencia a compresión aumenta también. Pero hay que considerar ciertas falencias en el desarrollo de los ensayos para determinar una relación entre la velocidad y la resistencia, considerando un intervalo de valores, más no un solo valor.

Mencionando otro estudio, se encuentra la **"INFLUENCIA DE LA INCORPORACIÓN DE VIDRIO TRITURADO EN LAS PROPIEDADES Y EL COMPORTAMIENTO A ALTA TEMPERATURA DE MORTEROS DE CEMENTO"**. De autoría de: Flores Alés, V., Jiménez Bayarri, V., & Pérez Fargallo, A. (2018). En el que los autores proponen comprobar el comportamiento del mortero cuando el árido es parcialmente reemplazado por vidrio doméstico reciclado y triturado en diferentes porcentajes. Determinar si el mortero estudiado es viable, a partir del análisis de sus características; además ver la correlación de los coeficientes de conductividad térmica cuando son sometidos a altas temperaturas.

Para el alcance de los objetivos elaboraron morteros prismáticos de 4 x 4 x 16 cm con una dosificación de relación cemento/arena de 1:3. El vidrio que utilizaron para sustitución del árido garantizó una adecuada compacidad en la mezcla final, las proporciones de sustitución fueron del 25% y 50%. La relación agua/cemento de 0.5 se mantuvo constante para garantizar la plasticidad de las muestras.

Para el desarrollo de este estudio, una vez que las muestras endurecieron, realizaron la caracterización química mediante fluorescencia de rayos X, determinaron los parámetros necesarios para poder calcular la conductividad térmica y verificar cuál es la capacidad de transmisión de calor del vidrio en los materiales; además, realizaron ultrasonidos para determinar la influencia del vidrio como agregado y la porosidad de la probeta.

Las probetas fueron ensayadas a flexión y compresión con una velocidad de carga de 50 N/s hasta su rotura, el ensayo a compresión lo realizaron en las dos mitades de la probeta, resultado del ensayo a flexión.

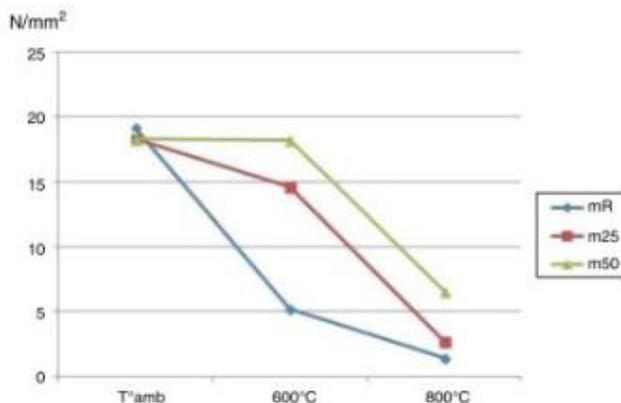
Después de caracterizar las probetas las sometieron a temperaturas de 600 y 800 °C, ya que esas son las temperaturas a las que se verifica una deshidratación del cemento y una pérdida de resistencia, respectivamente, según I. Hager, 2013 en "Behaviour of cement concrete at high temperatura". Mantuvieron las probetas a estas temperaturas por un periodo de una hora para comprobar el cambio de las características de los materiales después de ese proceso.

Dejaron que las probetas se enfriaran al aire y luego realizaron ensayos de flexión y compresión, de igual manera volvieron a realizar la caracterización química para identificar los cambios que sufrieron los materiales por efecto de las elevadas temperaturas a las que fueron sometidas. También observaron que el calentamiento provocó una alteración cromática notoria en las probetas, para estudiar esto, realizaron un análisis colorimétrico en las superficies de los tres tipos de mortero.

Los resultados de los ensayos mecánicos que realizaron con las muestras una vez que endurecieron, indicaron claramente que la incorporación de vidrio a la mezcla provoca una disminución en las resistencias, con el detalle de que el reemplazo del 50% denota una mejora respecto a la sustitución del 25%.

Las probetas a las que sometieron a altas temperaturas de 600 y 800 °C durante una hora, presentaron un comportamiento diferente, ya que las probetas que contenían vidrio en la mezcla, presentaron un mejor comportamiento que las probetas de referencia. Las muestras que fueron calentadas a 600 °C y no tenían vidrio en su composición, tuvieron una reducción representativa de la resistencia mientras que las que tenían vidrio sufrieron una pequeña disminución de resistencia.

A 800 °C las probetas sufrieron una mayor caída en la resistencia debido a la descomposición térmica del cemento hidratado; sin embargo, esta disminución es menor cuando las probetas tienen incorporado el vidrio en la mezcla.



*Figura 2.2.10 Evolución de las resistencias a compresión.*

*Fuente: (Flores Alés, Jiménez Bayarri, & Pérez Fargallo, 2018)*

## 2.5.2. HORMIGÓN ARMADO

Las propiedades mecánicas del hormigón estructural se ven afectadas mientras se eleva la temperatura, esto origina una reducción en la capacidad de carga, cambios de volumen, reducción de la resistencia de sus componentes, degradación de la adherencia, entre otros. Por lo cual se realiza este estudio del hormigón, que es expuesto a diferentes rangos de temperatura y tiempo de exposición, para tener una mejor idea de su comportamiento y de forma especial del acero, que es el material que se usa para reforzar el hormigón y mejorar su capacidad a tracción. (Castro & Sánchez, 2019)

Existen varios artículos de este tema, uno de ellos es **“ESTUDIO EN LABORATORIO DE LOS EFECTOS DE ALTAS TEMPERATURAS EN EL HORMIGÓN ARMADO: RESISTENCIA A FLEXIÓN.”** De autoría de Villacís, M. & Ortíz, A. (2002) en la Escuela Politécnica Nacional de Quito. Determinaron que existe

una notable pérdida de adherencia del hormigón con el acero cuando se alcanza temperaturas de 900°C, además un cambio de color en el hormigón que se torna de color amarillo. (Villacís, M. & Ortíz, A.,2002)

Al exponer una probeta en la misma temperatura a diferentes tiempos, en el módulo de rotura no existe una variación significativa en los resultados. Excepto en las temperaturas de 600°C y 900°C a 4 y 12 horas, como se indica en la figura:

TEMPERATURA (°C)	CUANTIA DE ACERO	MODULO DE ROTURA (kg/cm <sup>2</sup> )		DIFERENCIA (%)
		4 horas	12 horas	
600	2.78 ρ mín	45.96	38.49	16.25
900	1.78 ρ mín	18.19	14.97	17.7
	2.78 ρ mín	19.07	16.66	12.64

*Figura 2.2.11. Variaciones más significativas del módulo de rotura con el tiempo de exposición a una temperatura constante.*

*Fuente: (Villacís, M. & Ortíz, A.,2002)*

**“RESISTENCIA Y EFECTOS DEL FUEGO EN LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO”**, de autoría de Sebastián Villena Nicolau - Esteve Riba Genescá (2006), en la Universidad Politécnica de Cataluña, que tiene como objetivo conocer los efectos del fuego en los componentes del hormigón armado, debido a que sus propiedades presentan una variación al sobrepasar los 200 °C. Para los ensayos se empleó una armadura activa (pretensado) y una armadura pasiva (varillas de acero).

Las losas fueron expuestas a un intervalo de temperatura entre 20°C - 700°C durante diferentes intervalos de tiempo (30, 60, 90, 120, 180min). Los resultados obtenidos fueron que, al sobrepasar 500 °C las varillas de acero pierden un 50% de resistencia, mientras que en el acero pretensado pierde el 50% al sobrepasar 400 °C; adicionalmente se comprobó que las varillas no tienen una afectación en el cambio de la resistencia con temperaturas inferiores a 500°C. El acero pretensado pierde parte

de la resistencia ocasionado por poseer un bajo recubrimiento; concluyendo que al tener un recubrimiento mínimo de 3cm, la temperatura crítica es de 1100°C generando una reducción de la resistencia en un 40%. (Sebastián Villena Nicolau - Esteve Riba Genescá, 2006)

En Madrid, España se realizó la investigación **“RESISTENCIA AL FUEGO DE ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN”** de autoría de Manuel Burón y Luis Vega (2006), en donde se pudo establecer el decremento del módulo de elasticidad mientras la temperatura aumenta, para esto se utilizó losas de 10 cm de espesor expuestas a temperaturas entre 20°C - 700°C con distintos recubrimientos.

Los resultados obtenidos mostraron que el módulo de elasticidad tiene una variación a partir de 400 °C donde se reduce un 30%; mientras que la resistencia de la armadura de acero se ve afectada considerablemente al sobrepasar los 600°C se pierde el 60% de su resistencia. (Manuel Burón Maestro - Luis Vega Catalán, 2006)

En el estudio **“ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO DEL CONCRETO ESTRUCTURAL EXPUESTO AL FUEGO”** realizado por Giovanni Alvarado (2016), en la Universidad Técnica de Ambato, el estudio se realizó con 20 probetas, usaron las medidas detalladas en la norma ASTM C-31.

Las vigas fueron expuestas a temperaturas entre 700°C - 1100°C en distintos intervalos de tiempo (30, 60, 90, 120, 180min), se observó que el acero presenta alteraciones en sus propiedades físicas cuando se alcanza los 1000 °C como descascaramiento, cambio de coloración y endurecimiento superficial y transversal; todo esto debido a que el hormigón ya no actúa como un aislante térmico para proteger al acero de una exposición directa. (Alvarado Aguirre, 2016)

**“EFECTO DEL TIEMPO DE EXPOSICIÓN AL FUEGO EN LA RESISTENCIA A FLEXIÓN DE VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO”** de autoría de Maritza Elizabeth

Ureña Aguirre y Giovanni Josué Alvarado Aguirre (2018), realizado en la Universidad Técnica de Ambato, que se refiere a la evaluación de vigas con una resistencia a compresión de 21 MPa sometidas a flexión.

Se realizaron en total 21 vigas: 18 fueron expuestas a fuego directo en diferentes temperaturas para posteriormente ser sometidas a flexión, los tres restantes fueron ensayadas a temperatura ambiente. La prueba de flexión se la realizó en base a la norma ASTM C78; el resultado obtenido muestra que la resistencia a flexión disminuye de forma abismal conforme aumenta la temperatura, se reduce en un 90% cuando se alcanza la temperatura de 1050 °C con un tiempo de exposición de 180 minutos. El acero presentó un endurecimiento superficial, cambio de color, pérdida de sección al aumentar la temperatura. (Maritza Elizabeth Ureña Aguirre - Giovanni Josué Alvarado Aguirre, 2018)

**“Análisis en laboratorio de los efectos en la resistencia a compresión y tracción de elementos estructurales de hormigón armado post afectación por altas temperaturas”** creado por Castro, P. & Sánchez, D. (2019), en la Escuela Politécnica Nacional en Quito. Determinaron que a una temperatura de 300°C con 3 horas de exposición, el hormigón armado de las columnas sufre un daño 3% en su resistencia a compresión, mientras que a los 600 °C la resistencia se ve afectada entre un 7% y 22%. (Castro & Sánchez, 2019)

También concluyeron que el acero no se ve afectado cuando es expuesto a 300°C y 600°C, a diferencia de cuando se alcanza los 900°C, se pierde entre el 26% al 36% del esfuerzo de fluencia dependiendo al tiempo que esté expuesto. (Castro & Sánchez, 2019)

## CAPÍTULO 3

### 3. METODOLOGÍA

#### 3.1. CUBOS DE MORTERO

Para determinar el incremento de área de fisuramiento y los cambios de resistencia a compresión en el mortero, es necesario realizar un estudio experimental del comportamiento del material mediante la elaboración cubos de mortero, que van a ser sometidos a distintas temperaturas con varios tiempos de exposición.

##### 3.1.1. CANTIDAD DE PROBETAS

Según lo expuesto en la Norma NTE INEN 1855-1, señala que, para el análisis de la resistencia a compresión, es necesario obtener el resultado de mínimo tres especímenes. Para conocer el total de muestras se debe contabilizar el número de ciclos de exposición a realizarse, que se especifica en la tabla a continuación:

**Tabla 3.1**

*Número de probetas de mortero a fabricar.*

Cubos de mortero de 5cmx5cm de arista					
Temperatura [°C]	Tiempo [h]	# Probetas	Temperatura [°C]	Tiempo [h]	# Probetas
100	1	3	400	1	3
	2	3		2	3
	3	3		3	3
200	1	3	500	1	3
	2	3		2	3
	3	3		3	3
300	1	3	600	1	3
	2	3		2	3
	3	3		3	3
TOTAL		54			

Fuente:(Pérez&Rosero)

### 3.1.2. MATERIALES

En la Norma NTE INEN 488 que es para la “Determinación de resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50mm de arista”, indica los materiales necesarios a usarse para la elaboración de los cubos, los cuales son:

- Arena: la norma exige que debe ser una arena graduada normalizada, que es arena de sílice natural denominada arena “Ottawa”, pero en el presente estudio, se emplea arena natural de mina ya que es la que se usa en las obras regulares, misma que se ajustará con la granulometría de la arena Ottawa.

**Tabla 3.2.**

*Granulometría arena Ottawa.*

No. Tamiz	% Retenido	% Pasa
16	Ninguno	100
30	$2 \pm 2$	96 a 98
40	$30 \pm 5$	65 a 70
50	$75 \pm 5$	20 a 25
100	$98 \pm 2$	0 a 2

Fuente: (Luna, 2014)

- Cemento: se usa cemento portland; para la fabricación de las muestras de estudio, se va a usar el cemento hidráulico Tipo GU, que es el de mayor uso en la construcción normal y que está sujeta a la acción accidental de un incendio.



Figura 3.1: Cemento tipo GU.

Fuente: (Holcim, 2016)

- Agua: utilizar la cantidad necesaria de agua potable. (NTE INEN 488, 2009)

### 3.1.3. DOSIFICACIÓN DE CUBOS

Tomando en cuenta que se realiza un trabajo en laboratorio, para asegurar la repetitividad y homogeneidad de las probetas, su proceso de preparación también debe ser uniforme, por lo que se utiliza la mezcladora planetaria con el fin de mezclar los componentes.

La Norma NTE INEN 488 “Cemento Hidráulico. Determinación de la resistencia a la compresión de morteros en cubos de 50mm de arista”, detalla la cantidad de materiales que se necesita para distintas cantidades de probetas a preparar:

**Tabla 3.3**

*Dosificación Estándar de Cubos de Mortero.*

Material	6 especímenes
Cemento, g	500,00
Arena, g	1375
Agua, cm <sup>3</sup> -Cemento Tipo GU (a/c= 0,485) -Flujo: 110%	242

Fuente:(NTE INEN 488, 2009)

Por tanto, la cantidad de mortero a preparar depende de la capacidad del tazón de mezcla de la máquina planetaria, esto es 1500 cm<sup>3</sup>, con lo que se elaboran 12 probetas cúbicas, además se debe garantizar que la mezcla cumpla con un flujo de 110%, para esto fue necesario modificar la relación agua/cemento, debido al cambio de la arena normalizada al uso de la arena de la cantera de La Roca ubicada en la Mitad del Mundo, dando como resultado la siguiente dosificación:

**Tabla 3.4**

*Dosificación para 12 Cubos de Mortero.*

<b>Material</b>	<b>12 especímenes</b>
Cemento, g	1172,67
Arena, g	2062,50
Agua, g -Cemento Tipo GU (a/c= 0,576) -Flujo: 110%	675,00

Fuente:(NTE INEN 488, 2009)

### **3.1.4. EQUIPO E INSTRUMENTACIÓN PARA CUBOS**

- Mezcladora mecánica planetaria: es un dispositivo mecánico, con diferentes velocidades, que brinda un movimiento planetario y rotatorio a la paleta de mezclado. De marca Hobart N-50, con una capacidad de 5 litros, 3 engranajes sincronizados, modelo de mesa.



*Figura 3.2.: Mezcladora mecánica planetaria.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

- Mesa de Flujo: está compuesta por una estructura rígida de hierro y un plato circular liso de diámetro  $255\text{mm} \pm 2.5\text{mm}$ , que permita una caída vertical de  $12.7\text{mm}$  (NTE INEN 2500, 2009).



*Figura 3.3: Mesa de Flujo.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

- Encofrado: los moldes deben tener un ajuste perfecto, tal que garantice muestras cúbicas de  $50\text{mm}$  de arista, las caras interiores deben ser completamente lisas y además deben ser lo suficientemente rígidas para que no exista alabeos. Para este estudio se utiliza encofrados de madera,

previamente lacados para que no exista absorción de agua por parte de la madera, el cual consta de 5 compartimentos.



*Figura 3.4: Encofrado de Cubos.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

- Horno: se usa un horno programable de altas temperaturas de marca Nabertherm, modelos N300/H, con un controlador de programa C30, que se encuentra en el Laboratorio de Cerámica de la Escuela Politécnica Nacional.



*Figura 3.5: Horno utilizado para la afectación térmica de cubos de mortero.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

- Máquina de Ensayos a Compresión: es un equipo que permite realizar ensayos a compresión de distintos materiales, de marca SUZPECAR, modelo CHM 120, número de fabricación 1341, voltaje 220/380, 3 fases, frecuencia 50c/s, con una capacidad de carga máxima de 20 toneladas y control de carga eléctrico.



*Figura 3.6: Máquina de Ensayos Suzpecar.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

## **3.2. VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO**

Para analizar los cambios de las propiedades mecánicas (resistencia, ductilidad, elasticidad, tenacidad y resiliencia) del acero corrugado cuando es sometido a distintas temperaturas a varios tiempos de exposición, es esencial efectuar un estudio experimental del comportamiento del material mediante la elaboración vigas de hormigón armado con una varilla de 12mm de diámetro en el centro, con variación del recubrimiento de 3cm, 4cm y 5cm.

### **3.2.1. CANTIDAD DE PROBETAS DE VIGAS**

La cantidad de probetas a ensayar es de mínimo tres especímenes para obtener un promedio de resultados y garantizar que el margen de error o disipación sea el menor posible. Para conocer el número total de muestras se debe contabilizar el número de ciclos de cocción a realizarse, que se indica en la tabla 3.5:

**Tabla 3.5**

*Número de probetas de hormigón armado a fabricar.*

<b>Vigas de hormigón de 50 cm de longitud</b>			
Temperatura [°C]	Arista [cm]	Tiempo [h]	# Probetas
300	7.2	1	3
		2	3
		3	3
	9.2	1	3
		2	3
		3	3
	11.2	1	3
		2	3
		3	3
600	7.2	1	3
		2	3
		3	3
	9.2	1	3
		2	3
		3	3
	11.2	1	3
		2	3
		3	3
900	7.2	1	3
		2	3
		3	3
	9.2	1	3
		2	3
		3	3
	11.2	1	3
		2	3
		3	3
TOTAL			81

Fuente: (Pérez & Rosero)

### 3.2.2. MATERIALES

En la Norma NTE INEN 488 que es para Determinación de la resistencia a la compresión de morteros de cubos de 50mm de arista, indica los materiales necesarios a usarse para la elaboración de los cubos, los cuales son:

- Cemento: el cemento debe cumplir con las normas NTE INEN 490; para la fabricación de las muestras de estudio se va a usar el cemento hidráulico Tipo GU, que es el de mayor uso en la construcción normal y que está sujeta a la acción accidental de un incendio.



*Figura 3.7: Cemento tipo GU.*

*Fuente: (Holcim, 2016)*

- Áridos: se debe utilizar árido fino y grueso con las especificaciones que solicita la norma NTE INEN 872 de Áridos para hormigón, se utilizará ripio y arena extraídos de la cantera de La Roca ubicada en la Mitad del Mundo.
- Agua: debe ser agua potable, que garantice que la mezcla llegue a cumplir la relación a/c, trabajabilidad para llegar a la resistencia deseada y cumple parámetros físico-químicos.

### 3.2.3. DOSIFICACIÓN PARA VIGAS

Según la NEC-SE-HM en la sección 3.3.1. Resistencia a la compresión, donde se indica que la mínima resistencia a compresión que se puede utilizar para hormigones de exposiciones ambientales es de  $210\text{kg/cm}^2$ , para la cuantificación de la dosificación de las vigas se toma como referencia la Tabla 4.7 “Cantidades y relaciones a/c para diseño óptimo de 180 – 210 -240 y 280  $\text{kg/cm}^2$ ” de Orbe & Zúñiga:

**Tabla 3.6**

*Dosificación para hormigón.*

	PESOS EN Kg PARA 1 m <sup>3</sup>				a / c inicial	Sacos de cemento/m <sup>3</sup>
	AGUA	CEMENTO	ARENA	RIPIO		
f'c 180 Kg/cm <sup>2</sup>	219.06	264.88	769.25	958.57	0,672	5,30
f'c 210 Kg/cm <sup>2</sup>	217.80	284.80	752.94	958.57	0,625	5,70
f'c 240 Kg/cm <sup>2</sup>	215.07	315.04	726.85	958.57	0,565	6,30
f'c 280 Kg/cm <sup>2</sup>	226.23	335.22	709.44	958.57	0,531	6,70

Fuente:(Orbe & Zúñiga, 2013)

Para el armado de las vigas se ha utilizado varillas de acero corrugado de diámetro de 12mm de ADELCA.

### 3.2.4. EQUIPO E INSTRUMENTACIÓN PARA VIGAS

- Concretera: equipo empleado para mezclar los materiales y fabricar hormigón, se cuenta con una mezcladora de 1m<sup>3</sup> de capacidad. De marca Beton, con un motor a gasolina de 125AG, del año 1978.



*Figura 3.8: Concretera de 1m<sup>3</sup> de capacidad.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

- Horno: se usa un horno programable de altas temperaturas de marca Nabertherm, modelos N300/H, con un controlador de programa C30, que se encuentra en el Laboratorio de Cerámica de la Escuela Politécnica Nacional.



*Figura 3.9: Horno Nabertherm empleado para la afectación térmica de vigas de hormigón armado.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

- Encofrado: los moldes deben tener un ajuste perfecto, tal que garantice una longitud constante de 50cm y un área transversal de 7.2cm (3cm recubrimiento

a cada lado + 1.2cm diámetro de la varilla), 9.2cm (4cm recubrimiento a cada lado + 1.2cm diámetro de la varilla) y 11.2cm (5cm recubrimiento a cada lado + 1.2cm diámetro de la varilla). Las caras interiores deben ser completamente lisas y además deben ser lo suficientemente rígidas para que no exista alabeos. Para este estudio se utiliza encofrados de madera, previamente lacados para que no exista absorción de agua por parte de la madera, el cual consta de 4 compartimientos. Además, el acero fue colocado en el armado del encofrado para garantizar que esté centrado.



*Figura 3.10: Encofrado de Vigas.*

*Fuente:(Pérez&Rosero)*

- Marco de Prueba Hidráulico Universal: es un equipo para realizar ensayos a compresión o tracción de diversos materiales, de marca SHIMADZU, modelo UH-F 500 kn X, con capacidad de 500 KN y control de carga o posición electrónico.



*Figura 3.11: Marco de prueba hidráulico universal.*

*Fuente:(Pérez&Rosero)*

- Unidad de adquisición de datos: es un instrumento que permite almacenar datos, de marca CONTROLS, modelo 82-P9008, con ocho canales de entrada independientes y con una tasa de muestreo de hasta 500 lecturas por segundo por canal.



*Figura 3.12: Unidad de Adquisición de datos.*

*Fuente:(Pérez&Rosero)*

- Extensómetro: es un instrumento que permite medir la deformación de un material cuando es sometido a esfuerzos de tensión, de marca GEFRAN.



*Figura 3.13: Extensómetro.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

## CAPÍTULO 4

### 4. DISEÑO, FABRICACIÓN Y ENSAYO DE PROBETAS

#### 4.1. CUBOS DE MORTERO

##### 4.1.1. PROTOTIPO DE ENCOFRADOS

Se elaboró un prototipo de encofrado para verificar que el material cumpliera ciertos requisitos y el compartimiento de la mezcla no se viera afectado, por ejemplo, para que no exista fuga de agua en las uniones y evitar que la madera absorba la humedad de la mezcla, se colocó laca en todas sus caras y se utilizó pernos para que ejerzan presión sobre las paredes.



*Figura 4.1: Prototipo de Encofrados de Cubos.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

Al ensayar las muestras que fueron realizadas en el encofrado de madera y comparar los resultados con los de las muestras elaboradas en el encofrado de bronce, se comprobó que era eficiente; deduciendo que el nuevo encofrado tenía un buen comportamiento y no influía en el periodo de fraguado ni en la resistencia del mortero, por lo que se procedió a fabricar la cantidad necesaria de encofrados.

#### 4.1.2. SECADO DE LA ARENA

Para no afectar la relación agua/cemento, que debe ser constante en todas las mezclas con el fin de asegurar la resistencia final, se vio conveniente secar totalmente el agregado fino, durante 18 horas en un horno de ventilación a 110 grados C.; además, con la arena en estado seco, el proceso de tamizado se facilita notablemente.



*Figura 4.2: Secado de Arena.*

*Fuente: (Pérez&Rosero).*

#### 4.1.3. TAMIZADO DE LA ARENA

Se realiza el tamizado de la arena obtenida de la cantera “La Roca” para que cumpla con la granulometría de la arena Ottawa, como exige la Norma NTE INEN 488, misma que está especificada en la Tabla 3.2.

Para facilitar el proceso de tamizado se usó una tamizadora mecánica eléctrica programable, donde se estableció un tiempo de 5 min para cada ciclo.



Figura 4.3: Tamizado de Arena.

Fuente: (Pérez&Rosero)

#### 4.1.4. DOSIFICACIÓN DE LA ARENA

Una vez separada la arena en los distintos tamices se procedió a calcular la cantidad necesaria de cada tamiz para que cumpla la granulometría de la arena Ottawa, considerando la cantidad de arena total necesaria para fabricar los 55 cubos. Obteniendo la siguiente cantidad por cada tamiz:

**Tabla 4.1**

*Dosificación de Arena.*

Malla N	Abertura [mm]	Peso retenido [g]	% Retenido	Retenido Acumulado [%]	Porcentaje que pasa [%]	Porcentaje que pasa arena Ottawa [%]
16	1.18	0	0	0	100	100
30	0.6	302.5	2	2	98	96 a 98
40	0.425	4537.5	30	32	68	65 a 70
50	0.3	6806.25	45	77	23	20 a 25
100	0.15	3478.75	23	100	0	0 a 2
	TOTAL	15125	100			

Fuente: (Pérez&Rosero)

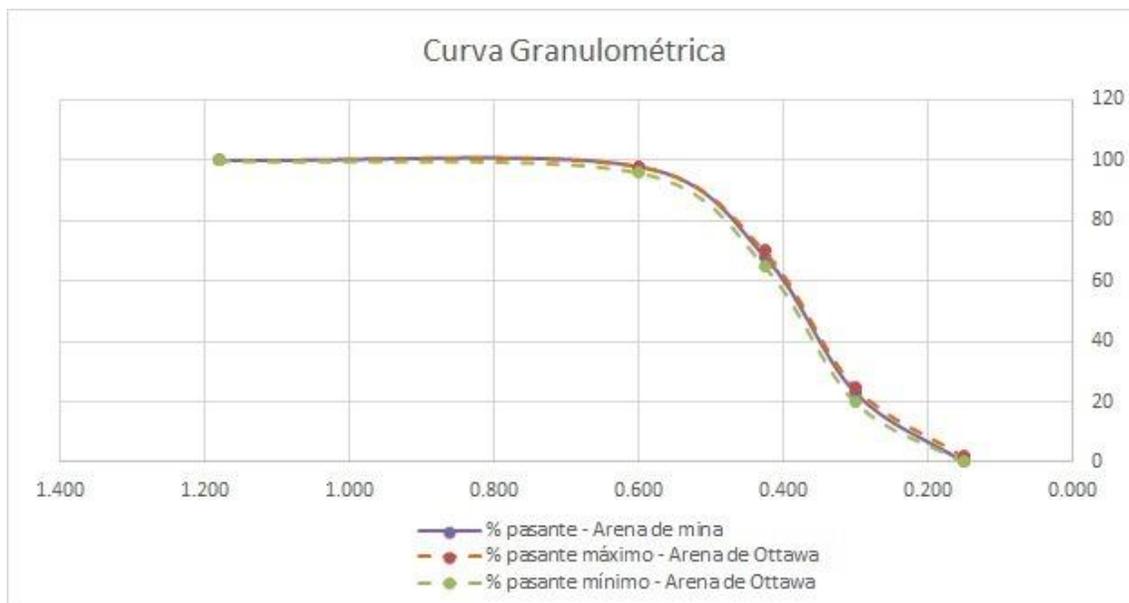


Figura 4.4.: Curva Granulométrica de Arena.

Fuente: (Pérez&Rosero)



Figura 4.5. Arena Graduada Normalizada.

Fuente:(Pérez&Rosero)

#### 4.1.5. PREPARACIÓN DE LA MEZCLA

Se debe seguir el proceso establecido en la norma NTE INEN155-2 “Cemento Hidráulico. Mezclado mecánico de pastas y morteros de consistencia plástica” y la cantidad de materiales especificados en la Tabla 3.4. “Dosificación para 12 cubos de mortero”.

- Pesar todos los materiales correspondientes para fabricar los doce cubos de mortero.



*Figura 4.6: Materiales para Mortero.*

*Fuente:(Pérez&Rosero)*

- Poner toda el agua en el tazón de la mezcladora planetaria de mezclado, añadir el cemento y encender a velocidad baja por 30 segundos.
- Añadir el total de arena progresivamente en un periodo de 30 segundos.
- Cambiar la velocidad a media y mezclar durante 30 segundos.
- Parar la mezcladora por 90 segundos y durante los primeros 15 segundos remover el material que se encuentre pegado en las paredes del tazón.
- Se finaliza con un mezclado a velocidad media por 60 segundos y se procede a comprobar el flujo.(NTE INEN 155, 2009)



*Figura 4.7: Mezcla de mortero.*

*Fuente:(Pérez&Rosero)*

#### 4.1.6. DETERMINACIÓN DEL FLUJO

La mezcla debe cumplir con una fluidez entre 105% y 115% luego de las 25 caídas de la mesa de flujo, como indica la norma NTE INEN 488 (NTE INEN 488, 2009). Para el desarrollo de este ensayo se siguió los pasos establecidos en la norma NTE INEN 2 502:2019:

- Limpiar y secar con una franela húmeda la mesa de flujo para colocar el molde de flujo en el centro.
- Colocar una primera capa de mortero hasta la mitad del molde y compactar con el apisonador 20 veces.
- Completar con una segunda capa y compactar con el apisonador 20 veces, enrasar el mortero con la ayuda de una espátula.



*Figura 4.8. Mortero en molde de flujo.*

*Fuente:(Pérez&Rosero)*

- Remover con cuidado el molde e inmediatamente dejar caer la mesa 25 veces en 15 segundos.



Figura 4.9 Mortero sobre la mesa de flujo.

Fuente:(Pérez&Rosero)

- Con ayuda de un calibrador se procede a medir el diámetro de la mezcla a lo largo de las cuatro líneas señaladas en la mesa de flujo.(NTE INEN 2 502, 2009)



Figura 4.10 Diámetro de ensayo de flujo.

Fuente: (Pérez&Rosero)

- Calcular el flujo con la siguiente ecuación:

$$\%F = \frac{\frac{d1 + d2 + d3 + d4}{4} - D_o}{D_o} * 100 \quad (7)$$

Do: diámetro interior de la base del molde de flujo. Do=10.16 [cm]

**Tabla 4.2***Resultado % de Flujo*

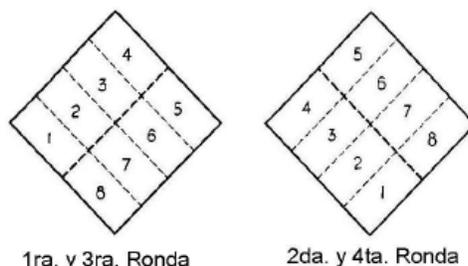
No. de Mezcla	d1 [cm]	d2 [cm]	d3 [cm]	d4 [cm]	% de Flujo
1	21.1265	21.0	21.17	21.14	107.86
2	21.41	21.26	21.25	21.38	109.89
3	21.07	21.18	21.09	21.07	107.702
4	21.37	21.37	21.79	21.62	111.98
5	21.0	21.44	21.5	21.16	109.4

Fuente: (Pérez&amp;Rosero)

**4.1.7. PREPARACIÓN DE PROBETAS**

El proceso para moldear las probetas se llevó a cabo en base a la Norma NTE INEN 488 en donde se indica que:

- Previamente engrasar todas las caras internas del encofrado para facilitar la fase de desencofrado.
- Colocar la primera capa de mezcla hasta la mitad del molde y apisonar cada compartimiento 32 veces en no más de 10 segundos. La compactación debe ser en 4 rondas con 8 golpes, como se muestra en la siguiente figura:

**Figura 4.11** Orden de apisonado.

Fuente: (Pérez&amp;Rosero)

- Poner una segunda capa de mezcla y repetir el proceso de apisonado antes mencionado.
- Completar los compartimientos con el material que haya rebosado y posteriormente enrasar con la ayuda de una espátula. (NTE INEN 488, 2009)



*Figura 4.12. Enrazado de Cubos.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

#### **4.1.8. DESENCOFRADO DE PROBETAS**

Al finalizar el moldeo colocar los encofrados en una zona húmeda, pero evitando que caigan gotas de agua sobre las muestras. Dejar que los especímenes endurezcan en un periodo recomendado por la norma de 20 a 72 horas.



*Figura 4.13. Fraguado de cubos.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

Una vez completado este periodo de endurecimiento se debe desencofrar las probetas cuidadosamente y ubicarlas en la piscina de curado durante 28 días. (NTE INEN 488, 2009)



*Figura 4.14 Desencofrado, etiquetado y curado de cubos.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

Después de sacar los cubos de la piscina de curado, se realizó un registro fotográfico de las caras de cubos antes de ser expuestas a la afectación térmica, que se evidenciará en el Anexo 1; esto con el fin de conocer el área de fisuración inicial del elemento.

#### **4.1.9. AFECTACIÓN TÉRMICA DE CUBOS**

Cuando los cubos de mortero hayan cumplido con su período de curado, se lleva hasta el horno de altas temperaturas programable para recibir tratamiento térmico que simule condiciones de incendio, según los ciclos indicados en la tabla:

**Tabla 4.3***Ciclos de exposición térmica de cubos.*

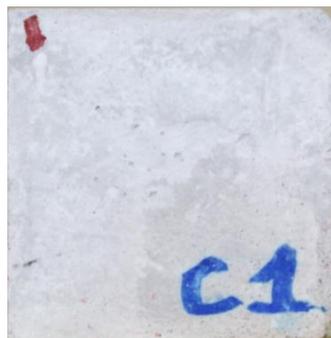
<b>Cubos de mortero de 5cmx5cm</b>		
Temperatura [°C]	Tiempo [h]	# Muestras
100	1	3
	2	3
	3	3
200	1	3
	2	3
	3	3
300	1	3
	2	3
	3	3
400	1	3
	2	3
	3	3
500	1	3
	2	3
	3	3
600	1	3
	2	3
	3	3
TOTAL		54

Fuente: (Pérez&amp;Rosero)

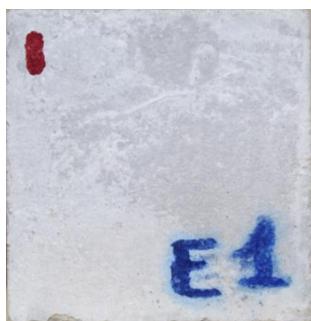
**4.1.10. REGISTRO FOTOGRÁFICO DE CUBOS DE MORTERO**

Luego de haber sido sometidos a altas temperaturas se dejó enfriar hasta una temperatura ambiente para proceder a tomar fotos de cada una de las caras de los cubos y posteriormente sacar el área de fisuramiento.

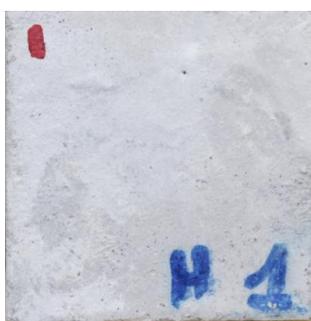
100° 1H



100° 2H



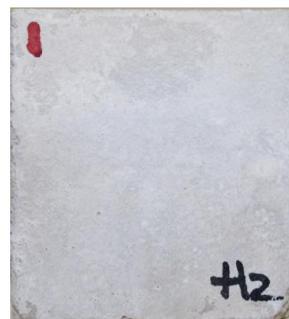
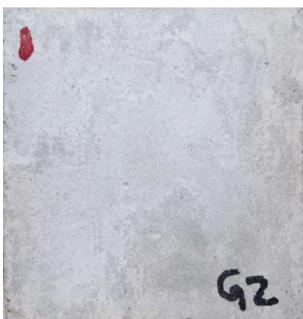
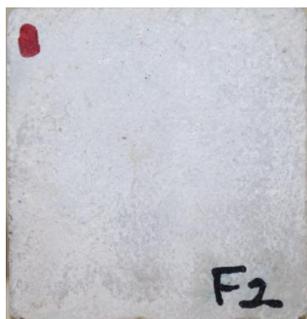
100° 3H



200° 1H



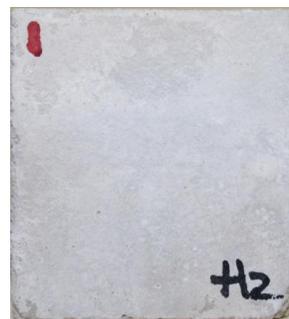
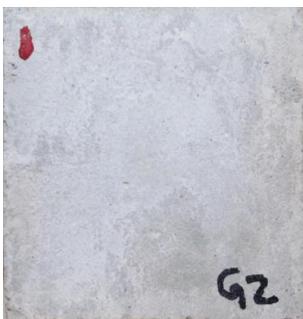
200° 2H



200° 3H



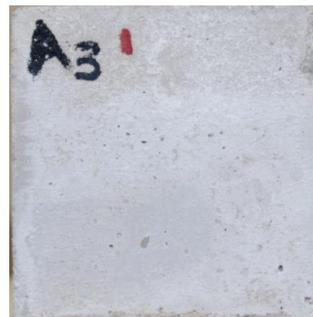
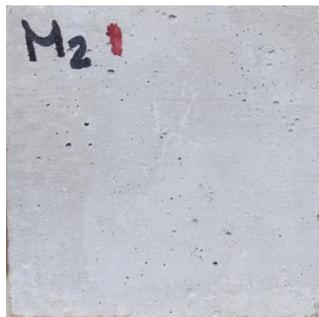
300° 1H



300° 2H



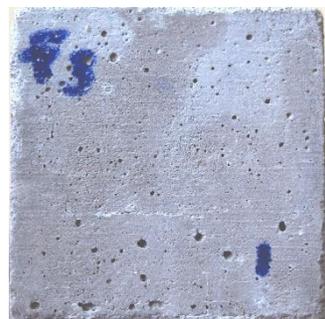
300° 3H



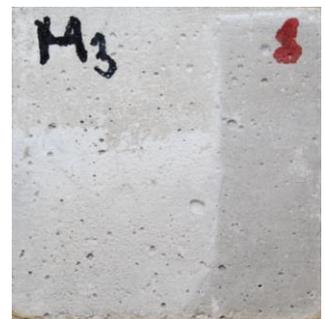
400° 1H



400° 2H



400° 3H



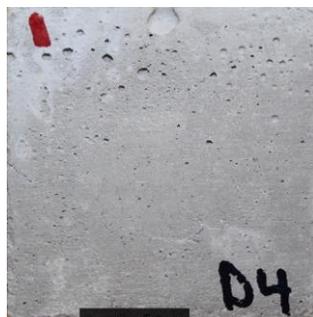
500° 1H



500° 2H

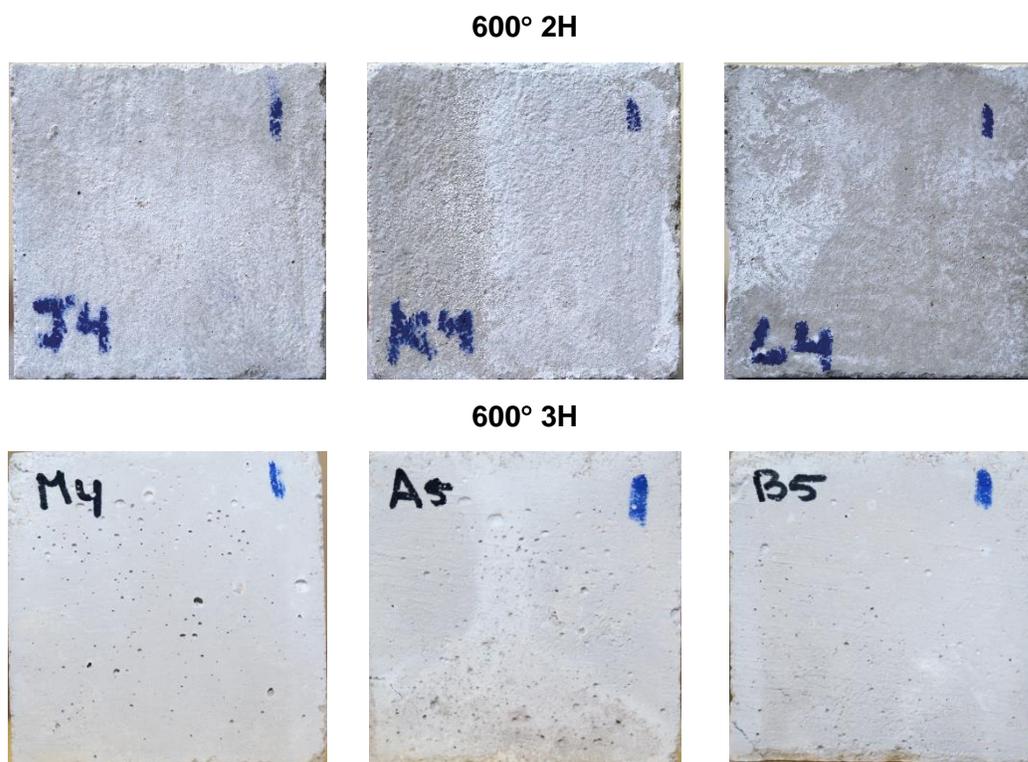


500° 3H



600° 1H





*Figura 4.15 Cubos tratados.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

#### **4.1.11. ENSAYO A COMPRESIÓN**

Una vez realizado el registro fotográfico, se procedió a realizar el ensayo a compresión, para obtener los resultados de las afectaciones en la resistencia causado por las altas temperaturas, para el ensayo hay que regirse a los pasos indicados en la Norma NTE INEN 488:

- Se debe limpiar granos sueltos que contenga la muestra o alguna irregularidad, ya que las caras que van a estar apoyadas tienen que ser completamente planas.
- Tomar por lo menos tres medidas de las caras del cubo que van a estar en contacto con la máquina y su peso total.
- Ubicar la muestra en la máquina de ensayo, centrado bajo el cabezal del apoyo superior, de tal forma que la carga sea aplicada sin excentricidades.



Figura 4.16 Compresión de Cubo.

Fuente: (Pérez&Rosero)

- Aplicar una velocidad de carga con un incremento uniforme hasta alcanzar una carga en el rango de 900 a 1800 N/s, esta velocidad debe alzarse durante la primera mitad de la carga máxima estima.
- Hacer un registro de la carga máxima total mostrada por la máquina de ensayo.



Figura 4.17 Registro de carga máxima.

Fuente: (Pérez&Rosero)

100° 1H



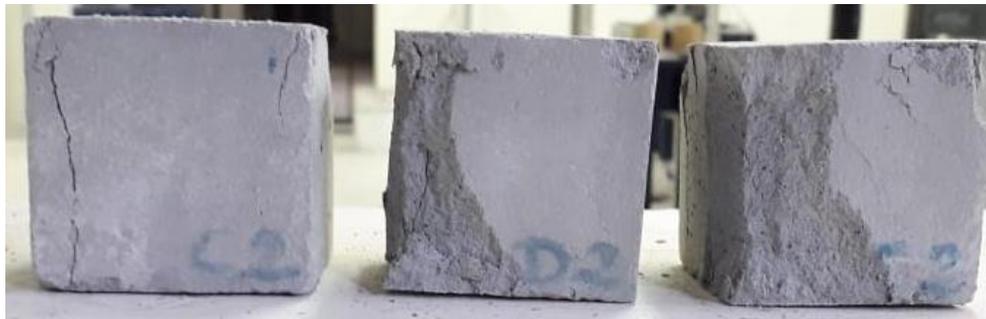
100° 2H



100° 3H



200° 1H



200° 2H



200° 3H



300° 1H



300° 2H



300° 3H



400° 1H



400° 2H



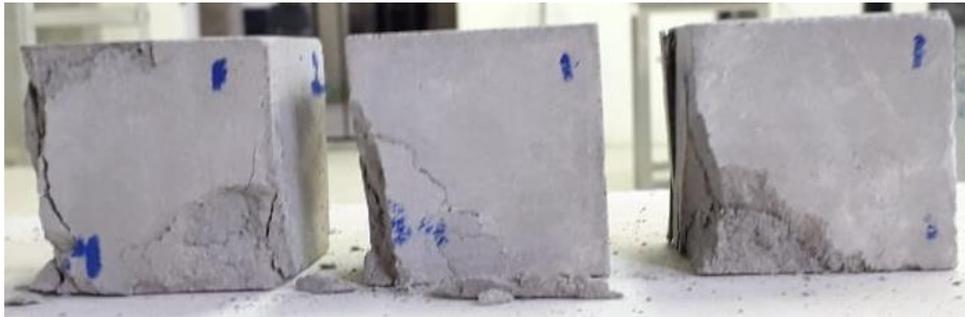
400° 3H



500° 1H



500° 2H



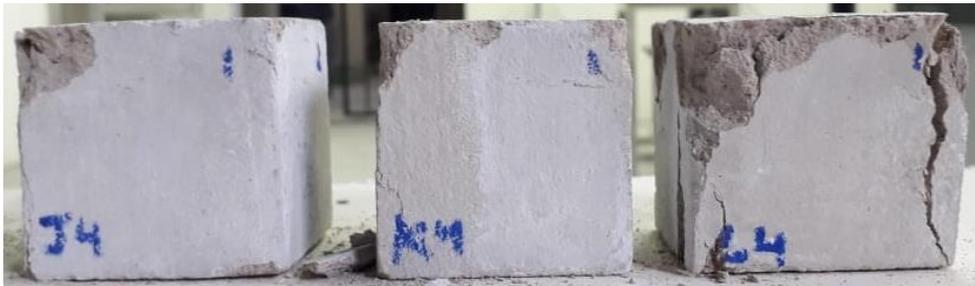
500° 3H



600° 1H



600° 2H



600° 3H



*Figura 4.18 Probetas ensayadas en las condiciones de exposición indicadas, tiempo y temperatura.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

## **4.2. VIGAS DE HORMIGÓN ARMADO**

### **4.2.1. ELABORACIÓN DE ENCOFRADOS**

Se elaboró un encofrado de madera que cumpliera ciertos requisitos para que la mezcla no se viera afectada, por ejemplo, se usó pernos para que ejercieran la presión suficiente y no se escape el agua por las uniones, además se colocó laca en todas las superficies del encofrado para evitar la absorción de agua por parte de la madera.

En la siguiente figura se puede apreciar que se elaboró 3 tamaños de encofrado debido a que las vigas tienen una longitud constante de 50 cm de largo pero un área transversal cuadrada de 7.2 cm, 9.2 cm y 11.2 cm de arista respectivamente, lo cual permitirá evidenciar el efecto del recubrimiento en el comportamiento mecánico de las varillas de acero de refuerzo, sometidas a la acción del fuego.



*Figura 4.19 Prototipo de Encofrados de Vigas.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

#### **4.2.2. SECADO DE AGREGADOS FINO Y GRUESO**

Para no trabajar con agregados que tengas diferentes condiciones de humedad, previamente se secó en un horno de ventilación durante 18 horas a 110°. Al secar los agregados se facilita el proceso de tamizado.(NTE INEN 2551, 2011)



*Figura 4.20.: Secado de Agregados.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

### **4.2.3. TAMIZADO DEL RIPIO**

Al tener tres diferentes tamaños de sección de vigas, es necesario tamizar el ripio para ajustar el tamaño nominal máximo para cada una de ellas. Se debe tomar en cuenta que el tamaño máximo no debe ser mayor que  $1/5$  de la menor dimensión de la estructura a fundirse, ni mayor que  $3/4$  del menor espacio libre entre varillas de la armadura del elemento (Luna, 2014). Considerando este criterio, se usa la tabla de Requisito de gradación para agregados gruesos, de la norma NTE INEN 696 – ASTM C 136 para establecer qué tamices se debe usar:

**Tabla 4.4.**

Requisito de gradación para áridos gruesos.

Size Number	Nominal Size	Porcentaje acumulado en peso que debe pasar cada tamiz (aberturas cuadradas)												
		4 in.	3 1/2 in.	3 in.	2 1/2 in.	2 in.	1 1/2 in.	1 in.	3/4 in.	1/2 in.	3/8 in.	No. 4	No. 8	No. 16
		100 mm	90.0 mm	75.0 mm	63.0 mm	50.0 mm	37.5 mm	25.0 mm	19.0 mm	12.5 mm	9.5 mm	4.75 mm	2.36 mm	1.18 mm
1	3 1/2 a 1 1/2 in. (90 a 37.5 mm)	100	90 a 100		25 a 60		0 a 15		0 a 5					
2	2 1/2 a 1 1/2 in. (63 a 37.5 mm)			100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 5					
3	2 a 1 in. (50 a 25.0 mm)				100	90 a 100	35 a 70	0 a 15		0 a 5				
357	2 in. a No 4 (50 a 4.75 mm)				100	95 a 100		35 a 70		10 a 30		0 a 5		
4	1 1/2 a 3/4 in. (37.5 a 19 mm)					100	90 a 100	20 a 55	0 a 15		0 a 5			
467	1 1/2 a No 4 (37.5 a 4.75 mm)					100	95 a 100		35 a 70		10 a 30	0 a 5		
5	1 a 1/2 in. (25.0 a 12.5 mm)						100	90 a 100	20 a 55	0 a 10	0 a 5			
56	1 a 3/8 in. (25.0 a 9.5 mm)						100	90 a 100	40 a 85	10 a 40	0 a 15	0 a 5		
57	1 in. a No 4 (25.0 a 4.75 mm)						100	95 a 100		25 a 60		0 a 10	0 a 5	
6	3/4 a 3/8 in. (19.0 a 9.5 mm)							100	90 a 100	20 a 55	0 a 15	0 a 5		
67	3/4 in. a No. 4 (19.0 a 4.75 mm)							100	90 a 100		20 a 55	0 a 10	0 a 5	
7	1/2 in. a No 4 (12.5 a 4.75 mm)								100	90 a 100	40 a 70	0 a 15	0 a 5	
8	3/8 a No 8 (9.5 a 2.36 mm)									100	85 a 100	10 a 30	0 a 10	0 a 5

Fuente:(Orbe & Zúñiga, 2013)



Figura 4.21.: Tamizado de ripio.

Fuente: (Pérez&Rosero)

#### 4.2.4. DOSIFICACIÓN DEL RIPIO

Una vez separado el ripio en los distintos tamices se procedió a calcular la cantidad necesaria de cada tamiz, considerando la cantidad de ripio total necesaria para fabricar las 81 vigas. Obteniendo la siguiente cantidad por cada tamiz:

**Tabla 4.5.**

*Dosificación ripio viga 7.2cm.*

<b>Viga de 50 cm de largo y área transversal de 7.2 cm</b>		
No. De Tamiz	Porcentaje Retenido	Cantidad [kg]
$\frac{3}{4}$	0	0
$\frac{1}{2}$	10	7.67
$\frac{3}{8}$	50	38.35

4	35	26.89
8	5	3.83
Bandeja	0	0
TOTAL:		76.74

Fuente: (Pérez&Rosero)

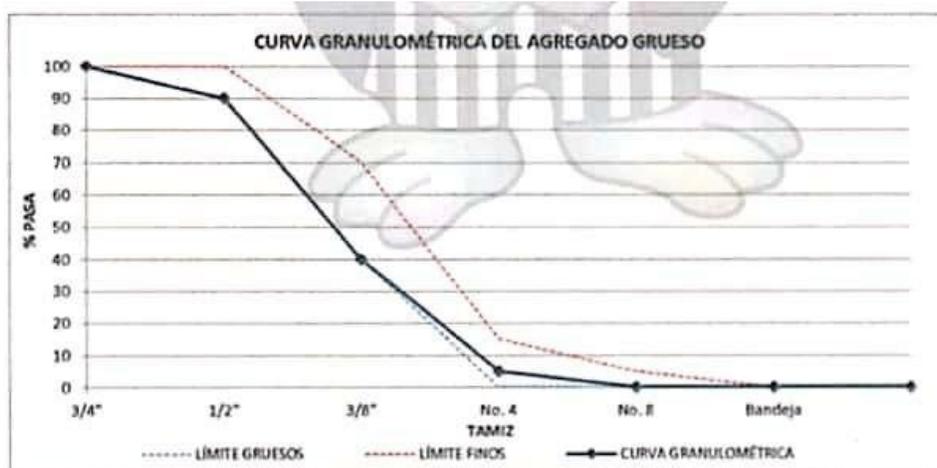


Figura 4.22 Curva granulométrica del agregado grueso, viga 7.2 cm.

Fuente: (LEMSUR)

**Tabla 4.6.:**

Dosificación ripio viga 9.2cm.

<b>Viga de 50 cm de largo y área transversal de 9.2 cm</b>		
No. De Tamiz	Porcentaje Retenido	Cantidad [kg]
1	0	0
3/4	10	12.43
1/2	30	37.38
3/8	30	37.38
4	20	24.96
8	10	12.46
Bandeja	0	0
TOTAL:		124.61

Fuente: (Pérez&Rosero)

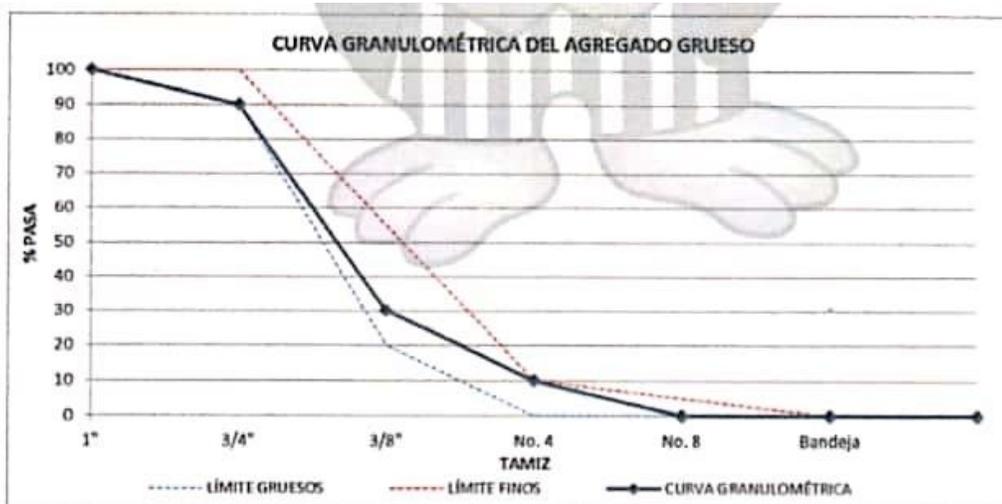


Figura 4.23.: Curva granulométrica del agregado grueso, viga 9.2 cm.

Fuente: (LEMSUR)

**Tabla 4.7.:**

Dosificación ripio viga 11.2cm.

Viga de 50 cm de largo y área transversal de 11.2 cm		
No. De Tamiz	Porcentaje Retenido	Cantidad [kg]
1	0	0
¾	10	17.25
½	30	51.76
3/8	30	51.76
4	20	34.52
8	10	17.25
TOTAL:		172.54

Fuente: (Pérez&Rosero)



Figura 4.24.: Curva granulométrica del agregado grueso, viga 11.2 cm.

Fuente: (LEMSUR)

#### 4.2.5. DOSIFICACIÓN DEL HORMIGÓN

Se determinó la cantidad de agregado fino, agregado grueso, agua y cemento necesarios, considerando el volumen necesario para cada una de las dosificaciones, en base a la Tabla 3.6. Dosificación para hormigón. (Orbe & Zúñiga, 2013). Se emplea esta referencia para elaborar un hormigón de resistencia a compresión de  $210 \text{ Kg/cm}^2$ , tomando en cuenta que no se realizará el análisis de este material, ya que únicamente trabaja como un elemento de recubrimiento para las varillas de acero corrugado.

A continuación, se presenta un ejemplo de cálculo de la cantidad de cada material para una viga de 7.2 cm de área transversal, que corresponde a 3 cm de recubrimiento:

- Datos iniciales para  $1\text{m}^3$ , de hormigón de  $210 \text{ Kg/cm}^2$ . (Orbe & Zúñiga, 2013)

Ripio: 958.57 [Kg]

Arena: 752.94 [Kg]

Agua: 217.80 [Kg]

Cemento: 284.80 [Kg]

- Cálculo de volumen de vigas.

$$Volumen = base * altura * longitud * \# \text{ de vigas} \quad (8)$$

$$Volumen = 7.2 \text{ cm} * 7.2 \text{ cm} * 50\text{cm} * 27$$

$$Volumen = 69984 \text{ cm}^3 = 0.069984\text{m}^3$$

- Consideración del porcentaje de desperdicio.

$$Volumen \text{ Total} = Volumen + 10\% \text{ Volumen} \quad (9)$$

$$Volumen \text{ Total} = 0.069984\text{m}^3 + 0.0069984\text{m}^3$$

$$Volumen \text{ Total} = 0.077 \text{ m}^3 \approx 0.08\text{m}^3$$

- Cálculo de cantidad de cada material.

$$\text{Ripio} = \frac{\text{Dato inicial} * \text{Volumen Total}}{1\text{m}^3} \quad (10)$$

$$\text{Ripio} = \frac{958.57 \text{ Kg} * 0.08 \text{ m}^3}{1\text{m}^3} = 76.69 \text{ Kg}$$

$$\text{Arena} = \frac{752.94 \text{ Kg} * 0.08 \text{ m}^3}{1\text{m}^3} = 60.24 \text{ Kg}$$

$$\text{Agua} = \frac{217.80 \text{ Kg} * 0.08 \text{ m}^3}{1\text{m}^3} = 17.43 \text{ Kg}$$

$$\text{Cemento} = \frac{284.80 \text{ Kg} * 0.08 \text{ m}^3}{1\text{m}^3} = 22.78 \text{ Kg}$$

**Tabla 4.8.***Dosificación hormigón viga 7.2cm.*

<b>Viga de 50 cm de largo y área transversal de 7.2 cm</b>	
<b>Material</b>	<b>Cantidad [kg]</b>
Ripio	76.69
Arena	60.24
Agua	17.43
Cemento	22.78

Fuente: (Pérez&amp;Rosero)

**Tabla 4.9.***Dosificación hormigón viga 9.2cm.*

<b>Viga de 50 cm de largo y área transversal de 9.2 cm</b>	
<b>Material</b>	<b>Cantidad [kg]</b>
Ripio	124.61
Arena	97.88
Agua	28.31
Cemento	37.02

Fuente: (Pérez&amp;Rosero)

**Tabla 4.10.***Dosificación hormigón viga 11.2cm.*

<b>Viga de 50 cm de largo y área transversal de 11.2 cm</b>	
<b>Material</b>	<b>Cantidad [kg]</b>
Ripio	172.54

Continuación Tabla 4.10. Dosificación hormigón viga 11.2cm.

Material	Cantidad [kg]
Arena	135.53
Agua	39.20
Cemento	51.26

Fuente: (Pérez&Rosero)

#### 4.2.6. ELABORACIÓN DEL HORMIGÓN

Se debe seguir el proceso establecido en la norma NTE INEN 2551.

- Pesar todos los materiales



Figura 4.25. Materiales para hormigón.

Fuente:(Pérez&Rosero)

- Poner todos los materiales en la mezcladora e ir añadiendo paulatinamente el agua, hasta que el hormigón tenga una apariencia homogénea.
- La norma NTE INEN 2551, sugiere realizar un mezclado de 3 minutos, un descanso de 3 minutos y finalmente un mezclado de 2 minutos. (NTE INEN 2551, 2011)



*Figura 4.26. Colocación de materiales en la mezcladora.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

- Colocar una bandeja metálica limpia y humedecida bajo la mezcladora.
- Descargar la mezcla con cuidado sobre la bandeja.



*Figura 4.27. Descarga de concreto en la bandeja.*

*Fuente:(Pérez&Rosero)*

#### 4.2.7. ELABORACIÓN DE VIGAS

- Al momento de ensamblar el encofrado se coloca las varillas, procurando que estas queden fijas y centradas en cada una de las secciones.
- Engrasar todas las caras internas del encofrado para facilitar la fase de desencofrado, evitando que el aceite tenga contacto con la varilla.



Figura 4.28 Engrasada de encofrado de vigas.

Fuente: (Pérez&Rosero)

- Con la ayuda de una pala colocar la mezcla en el encofrado procurando cubrir toda la superficie.



Figura 4.29 Preparación de vigas.

Fuente: (Pérez&Rosero)

- De acuerdo a la Tabla 2 de la Norma ASTM C192 “Practica normalizada para preparación y curado de especímenes de concreto para ensayo en laboratorio”, dar 25 varillados repartidos en toda el área de la viga.



*Figura 4.30 Varillado de vigas.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

- Completar los compartimientos con el material que haya rebosado y posteriormente enrasar con la ayuda de un bailejo y una pala de enlucir.



*Figura 4.31 Enrazado de vigas.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

#### **4.2.8. DESENCOFRADO DE PROBETAS**

Al finalizar el moldeo, colocar los encofrados en una zona húmeda, evitando que caigan gotas de agua sobre las muestras. Dejar que los especímenes endurezcan en

un periodo de 20 a 72 horas, el cual es recomendado por la norma NTE INEN 488, de 20 a 72 horas.



*Figura 4.32 Fraguado de vigas.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

Una vez completado este periodo de fraguado inicial se debe desencofrar las probetas cuidadosamente y ubicarlas en la piscina de curado durante 28 días, asegurando que el agua cubra toda la superficie del elemento. El agua debe tener una temperatura  $23^{\circ}\text{C} \pm 2^{\circ}\text{C}$ . (NTE INEN 488, 2009)



*Figura 4.33 Curado de vigas.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

#### 4.2.9. AFECTACIÓN TÉRMICA DE VIGAS

Cuando las vigas de hormigón hayan finalizado con el proceso de curado: con ayuda de una franela se quita el exceso de agua, para someterles a altas temperaturas en el horno programable, como se indica en la tabla a continuación:

**Tabla 4.11**

*Ciclos de afectación térmica de vigas.*

<b>Vigas de hormigón de 50cm de longitud</b>			
Temperatura [°C]	Arista [cm]	Tiempo [h]	# Muestras
300	7.2	1	3
		2	3
		3	3
	9.2	1	3
		2	3
		3	3
	11.2	1	3
		2	3
		3	3
600	7.2	1	3
		2	3
		3	3
	9.2	1	3
		2	3
		3	3
	11.2	1	3
		2	3
		3	3
900	7.2	1	3
		2	3
		3	3
	9.2	1	3
		2	3
		3	3

Continuación Tabla 4.11. Ciclos de afectación térmica de vigas.

Temperatura [°C]	Arista [cm]	Tiempo [h]	# Muestras
900	11.2	1	3
		2	3
		3	3
TOTAL			81

Fuente: (Pérez&Rosero)



Figura 4.34 Vigas calentadas.

Fuente: (Pérez&Rosero)

#### 4.2.10. EXTRACCIÓN DE VARILLAS

Luego del tratamiento térmico y una vez que las vigas se equilibran con la temperatura ambiente, se procedió a extraer las varillas de cada una de ellas, con el propósito de establecer la afectación que sufre el acero de refuerzo debido a la acción térmica. Para facilitar este proceso se usó la máquina de compresión; se colocó unas placas base de acero para que la carga aplicada se distribuya en toda el área de la viga, de esta manera se evitó un posible pandeo en la varilla.



*Figura 4.35 Rotura de vigas.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

Finalmente, con la ayuda de un combo se retiró el material que aún estaba adherido a la varilla.

#### **4.2.11. ENSAYO A TRACCIÓN DE VARILLAS**

Para realizar el ensayo de tracción de las varillas se va a regir en el procedimiento descrito en la norma NTE INEN ISO 6892-1 “Materiales mecánicos – Ensayo de tracción – Parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente”:

- Tomar tres medidas del diámetro de la varilla (dos de los extremos y uno del centro) con el calibrador digital y una medida de la longitud inicial con el flexómetro.
- Ubicar el extensómetro en el centro de la varilla.
- Colocar la varilla en la máquina de ensayos, procurando que las tenazas sujeten al menos 5cm de cada extremo de la varilla.
- Verificar que la máquina de ensayos y la unidad de adquisición de datos se encuentren encendidas.
- Iniciar el ensayo y esperar que la varilla llegue a la fractura.
- Liberar la varilla de las mordazas y registrar la longitud final de la varilla.

## CAPÍTULO 5

### 5. ANÁLISIS DE RESULTADOS

#### 5.1. PROPIEDADES DE CUBOS DE MORTERO

##### 5.1.1. CÁLCULO DEL ÁREA DE FISURACIÓN

El área de fisuración de los cubos se determinó utilizando el programa AutoCAD, en donde se realizó el trazado de las fisuras de las caras de los cubos, antes y después de haber sido sometidos a diferentes temperaturas.



*Figura 5.1: Gráfica de fisuras antes y después.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

El área de cada cubo se obtuvo sumando las fisuras de sus seis caras; posteriormente para encontrar el área real de fisuración, se calculó la diferencia entre el área de fisuración del cubo sin afectación térmica y del cubo que fue sometido a altas temperaturas. Finalmente se determina el área de fisuración promedio de las probetas.

En la tabla 5.1. se resumen el área de fisuración de cada uno de los cubos para los diferentes ciclos de temperatura.

**Tabla 5.1**

*Área de fisuración de cubos de mortero.*

No.	Descripción		Área Cubos [cm <sup>2</sup> ]	Área Promedio	No.	Descripción		Área Cubos [cm <sup>2</sup> ]	Área Promedio
	J5		NATURAL	0.159	28	B3		400° 1H	0.582
	H5		NATURAL	0.159	29	C3	1	400° 1H	0.768
	E5		NATURAL	0.159	30	D3		400° 1H	0.339
1	A1		100° 1H	0.184	31	F3		400° 2H	0.819
2	B1	1	100° 1H	0.157	32	G3	2	400° 2H	0.593
3	C1		100° 1H	0.145	33	H3		400° 2H	0.945
4	D1		100° 2H	0.196	34	I3		400° 3H	1.194
5	E1	2	100° 2H	0.253	35	J3	3	400° 3H	1.106
6	F1		100° 2H	0.292	36	H3		400° 3H	1.147
7	G1		100° 3H	0.362	37	K3		500° 1H	1.042
8	H1	3	100° 3H	0.392	38	L3	1	500° 1H	0.948
9	I1		100° 3H	0.403	39	M3		500° 1H	0.982
10	C2		200° 1H	0.468	40	A4		500° 2H	1.173
11	D2	1	200° 1H	0.460	41	B4	2	500° 2H	1.073
12	E2		200° 1H	0.440	42	C4		500° 2H	1.132
13	A2		200° 2H	0.507	43	D4		500° 3H	1.254
14	B2	2	200° 2H	0.530	44	E4	3	500° 3H	1.095
15	H1		200° 2H	0.510	45	F4		500° 3H	2.051
16	J1		200° 3H	0.950	46	G4		600° 1H	1.512
17	K1	3	200° 3H	0.549	47	H4	1	600° 1H	1.946
18	L1		200° 3H	0.318	48	I4		600° 1H	1.566
19	F2		300° 1H	0.490	49	J4		600° 2H	2.389
20	G2	1	300° 1H	0.539	50	K4	2	600° 2H	2.021
21	H1		300° 1H	0.549	51	L4		600° 2H	1.200
22	I2		300° 2H	0.716	52	A5		600° 3H	2.259
23	J2	2	300° 2H	0.692	53	B5	3	600° 3H	2.147
24	K2		300° 2H	0.720	54	M4		600° 3H	2.300
25	L2		300° 3H	1.109					
26	M2	3	300° 3H	1.097					
27	I5		300° 3H	1.093					

Fuente: (Pérez&Rosero)

### 5.1.2. RESISTENCIA A COMPRESIÓN

La tabla 5.2. evidencia los resultados de la resistencia a compresión  $f'_c$ , que fueron emitidos por el Laboratorio de Ensayos de Materiales, Suelos y Rocas (LEMSUR), basándose para el cálculo en la norma ASTM C109M-13 “Método de prueba estándar para la resistencia a compresión de morteros de cemento hidráulico (utilizando muestras cúbicas de 2 pulgadas [50 mm])”.

**Tabla 5.2**

*Resistencia a compresión de cubos de mortero.*

No.	Fecha Fabrica	Descripción		Fecha Rotura	PESO [g]	CARGA [T]	P. ESPECIFICO [g/cm <sup>3</sup> ]	F'c [kg/cm <sup>2</sup> ]	F'c [Mpa]	
	22-ene-20	J5	0	Natural	02-mar-20	279.90	8.395	2.23	337.64	33.11
	22-ene-20	H5		Natural	02-mar-20	279.40	8.076	2.79	325.26	31.9
	22-ene-20	E5		Natural	02-mar-20	286.10	7.786	2.22	308.49	30.25
1	22-ene-20	A1	1	100° 1H	02-mar-20	264.20	9.090	2.10	360.40	35.34
2	22-ene-20	B1		100° 1H	02-mar-20	266.80	9.733	2.12	387.56	38.01
3	22-ene-20	C1		100° 1H	02-mar-20	258.60	10.474	1.10	423.59	41.54
4	22-ene-20	D1	2	100° 2H	02-mar-20	266.90	9.370	2.14	374.73	36.75
5	22-ene-20	E1		100° 2H	02-mar-20	260.60	9.952	2.12	403.08	39.53
6	22-ene-20	F1		100° 2H	02-mar-20	264.70	9.570	2.11	381.97	37.46
7	22-ene-20	G1	3	100° 3H	02-mar-20	262.60	9.865	2.09	394.28	38.67
8	22-ene-20	H1		100° 3H	02-mar-20	255.80	9.469	2.06	379.98	37.26
9	22-ene-20	I1		100° 3H	02-mar-20	255.60	10.115	2.07	411.32	40.34
10	22-ene-20	C2	1	200° 1H	13-ago-20	244.60	7.097	1.85	275.56	27.02
11	22-ene-20	D2		200° 1H	13-ago-20	250.00	8.190	1.84	310.01	30.40
12	22-ene-20	E2		200° 1H	13-ago-20	247.00	8.841	1.90	344.62	33.80
13	22-ene-20	A2	2	200° 2H	13-ago-20	240.00	8.367	1.85	325.49	31.92
14	22-ene-20	B2		200° 2H	13-ago-20	243.20	8.265	1.87	322.16	31.59
15	22-ene-20	H1		200° 2H	13-ago-20	244.80	9.773	1.86	375.74	36.85
16	22-ene-20	J1	3	200° 3H	13-ago-20	245.00	7.439	1.83	283.22	27.77
17	22-ene-20	K1		200° 3H	13-ago-20	248.00	8.710	1.83	330.99	32.46
18	22-ene-20	L1		200° 3H	13-ago-20	247.20	8.553	1.90	333.41	32.70
19	22-ene-20	F2	1	300° 1H	02-mar-20	239.90	9.665	1.94	389.40	38.19
20	22-ene-20	G2		300° 1H	02-mar-20	239.20	9.166	1.91	366.36	35.93
21	22-ene-20	H1		300° 1H	02-mar-20	240.00	9.645	1.95	392.28	38.47
22	22-ene-20	I2	2	300° 2H	13-ago-20	244.60	5.243	1.87	315.60	30.95

Continuación Tabla 5.2. Resistencia a compresión de cubos de mortero.

No.	Fecha Fabrica	Descripción		Fecha Rotura	PESO [g]	CARGA [T]	P. ESPECIFICO [g/cm]	F'c [kg/cm <sup>2</sup> ]	F'c [Mpa]	
23	22-ene-20	J2		300° 2H	13-ago-20	245.60	6.388	1.84	327.43	32.11
24	22-ene-20	K2		300° 2H	13-ago-20	246.00	6.117	1.88	320.70	31.45
25	22-ene-20	L2		300° 3H	02-mar-20	237.70	7.072	1.84	275.28	27.00
26	22-ene-20	M2	3	300° 3H	02-mar-20	235.30	6.035	1.88	239.28	23.47
27	22-ene-20	I5		300° 3H	02-mar-20	234.40	8.057	1.75	309.33	30.44
28	22-ene-20	B3		400° 1H	13-ago-20	245.50	7.640	1.86	295.47	28.98
29	22-ene-20	C3	1	400° 1H	13-ago-20	244.80	5.776	1.86	228.74	22.43
30	22-ene-20	D3		400° 1H	13-ago-20	240.30	7.040	1.93	280.50	27.51
31	22-ene-20	F3		400° 2H	13-ago-20	238.50	5.836	1.80	231.21	22.58
32	22-ene-20	G3	2	400° 2H	13-ago-20	240.10	6.531	1.79	253.59	24.87
33	22-ene-20	H3		400° 2H	13-ago-20	240.40	7.837	1.78	304.27	29.84
34	22-ene-20	I3		400° 3H	09-mar-20	237.40	7.995	1.85	202.42	19.85
35	22-ene-20	J3	3	400° 3H	09-mar-20	238.60	8.148	1.82	210.57	20.65
36	22-ene-20	H3		400° 3H	09-mar-20	236.10	8.543	1.81	222.91	21.86
37	22-ene-20	K3		500° 1H	09-mar-20	234.00	7.259	1.81	282.99	27.75
38	22-ene-20	L3	1	500° 1H	09-mar-20	236.30	8.547	1.82	333.18	32.67
39	22-ene-20	M3		500° 1H	09-mar-20	235.00	7.572	1.80	291.71	28.61
40	22-ene-20	A4		500° 2H	13-ago-20	236.50	5.989	1.80	230.71	22.62
41	22-ene-20	B4	2	500° 2H	13-ago-20	236.40	7.516	1.83	293.58	28.79
42	22-ene-20	C4		500° 2H	13-ago-20	237.50	6.534	1.82	250.76	24.59
43	22-ene-20	D4		500° 3H	09-mar-20	235.00	6.564	1.82	256.88	25.19
44	22-ene-20	E4	3	500° 3H	09-mar-20	236.60	5.733	1.82	224.40	22.01
45	22-ene-20	F4		500° 3H	09-mar-20	235.10	6.815	1.80	264.59	25.95
46	22-ene-20	G4		600° 1H	09-mar-20	230.50	3.304	1.80	199.43	19.56
47	22-ene-20	H4	1	600° 1H	09-mar-20	233.10	3.726	1.83	203.28	19.93
48	22-ene-20	I4		600° 1H	09-mar-20	232.60	3.095	1.81	167.76	16.45
49	22-ene-20	J4		600° 2H	13-ago-20	242.60	5.136	1.87	167.44	16.42
50	22-ene-20	K4	2	600° 2H	13-ago-20	242.10	5.225	1.87	172.23	16.89
51	22-ene-20	L4		600° 2H	13-ago-20	242.60	4.321	1.87	176.00	17.26
52	22-ene-20	A5		600° 3H	13-ago-20	235.10	3.354	1.79	131.51	12.90
53	22-ene-20	B5	3	600° 3H	13-ago-20	240.90	3.285	1.79	127.53	12.51
54	22-ene-20	M4		600° 3H	13-ago-20	234.70	4.093	1.82	161.78	15.87

Fuente: (Pérez&amp;Rosero)

Debido a que algunos de los datos se encontraban dispersos, se calculó la desviación estándar de cada ciclo para encontrar el rango de los datos que fuesen aceptables y de cuáles debían ser descartados. Posteriormente se calculó el promedio con los datos iniciales y otro con los datos del rango de la desviación, y de esta manera encontrar la resistencia a compresión final que muestre mejor comportamiento.

**Tabla 5.3.**

*Resistencia a compresión final de cubos de mortero.*

No.	Descripción		F'c [Mpa]	Esfuerzo Promedio	Desv.	Min.	Max.	Valores dentro del rango	F'c Desv.	F'c Final [MPa]
	Natural		33.11	31.75	1.44	30.32	33.19	33.11	32.51	32.51
	Natural		31.90					31.90		
	Natural		30.25							
1	A1	1	100° 1H	38.30	3.11	35.19	41.41	35.34	36.68	36.68
2	B1		100° 1H					38.01		
3	C1		100° 1H					41.54		
4	D1	2	100° 2H	37.91	1.44	36.47	39.36	36.75	37.11	37.11
5	E1		100° 2H					39.53		
6	F1		100° 2H					37.46		
7	G1	3	100° 3H	38.76	1.54	37.21	40.30	38.67	37.97	37.97
8	H1		100° 3H					37.26		
9	I1		100° 3H					40.34		
10	C2	1	200° 1H	37.53	1.39	36.14	38.92		35.93	35.93
11	D2		200° 1H					35.93		
12	E2		200° 1H					38.47		
13	A2	2	200° 2H	33.45	2.95	30.51	36.40	31.92	31.76	31.76
14	B2		200° 2H					31.59		
15	H1		200° 2H					36.85		
16	J1	3	200° 3H	30.98	2.78	28.20	33.76		32.58	32.58
17	K1		200° 3H					32.46		
18	L1		200° 3H					32.70		
19	F2	1	300° 1H	30.41	3.39	27.02	33.80		32.10	32.10
20	G2		300° 1H					30.40		
21	H1		300° 1H					33.80		
22	I2	2	300° 2H	31.50	0.58	30.92	32.09	30.95	31.20	31.20
23	J2		300° 2H					32.11		
24	K2		300° 2H					31.45		

Continuación Tabla 5.3. Resistencia a compresión final de cubos de mortero.

No.	Descripción		F'c [Mpa]	Esfuerzo Promedio	Desv.	Min.	Max.	Valores dentro del rango	F'c Desv.	F'c Final [MPa]
25	L2	3	300° 3H	27.00	26.97	3.49	23.48	30.46	28.72	28.72
26	M2		300° 3H	23.47						
27	I5		300° 3H	30.44						
28	B3	1	400° 1H	28.98	26.31	3.44	22.87	29.74	28.25	28.25
29	C3		400° 1H	22.43						
30	D3		400° 1H	27.51						
31	F3	2	400° 2H	22.58	25.76	3.71	22.05	29.47	23.73	23.73
32	G3		400° 2H	24.87						
33	H3		400° 2H	29.84						
34	I3	3	400° 3H	19.85	20.79	1.01	19.77	21.80	20.25	20.25
35	J3		400° 3H	20.65						
36	H3		400° 3H	21.86						
37	K3	1	500° 1H	27.75	29.68	2.63	27.05	32.30	28.18	28.18
38	L3		500° 1H	32.67						
39	M3		500° 1H	28.61						
40	A4	2	500° 2H	25.19	24.38	2.09	22.29	26.47	25.57	25.57
41	B4		500° 2H	22.01						
42	C4		500° 2H	25.95						
43	D4	3	500° 3H	22.62	25.33	3.15	22.18	28.48	23.61	23.61
44	E4		500° 3H	28.79						
45	F4		500° 3H	24.59						
46	G4	1	600° 1H	19.56	18.65	1.28	17.37	19.92	19.56	19.56
47	H4		600° 1H	19.93						
48	I4		600° 1H	16.45						
49	J4	2	600° 2H	16.42	16.86	1.91	14.95	18.77	16.86	16.86
50	K4		600° 2H	16.89						
51	L4		600° 2H	17.26						
52	A5	3	600° 3H	12.90	13.76	1.84	11.92	15.60	12.71	13.76
53	B5		600° 3H	12.51						
54	M4		600° 3H	15.87						

Fuente: (Pérez&amp;Rosero)

### 5.1.3. RESULTADOS GRÁFICOS DEL ÁREA DE FISURACIÓN EN FUNCIÓN DEL TIEMPO Y DE LA TEMPERATURA EN EXPOSICIÓN

Las siguientes gráficas se obtuvieron de los valores promedios encontrados en la tabla 5.1., en los que se relaciona el tiempo (1h, 2h y 3h) vs área de fisuración de los cubos de mortero de 5cm de arista, para cada temperatura (100°, 200°, 300°, 400°, 500° y 600°). El área está expresada en [cm<sup>2</sup>] y el tiempo en [horas]. Además, se gráfica la variación del área de fisuración en función de la temperatura, para cada tiempo de exposición.

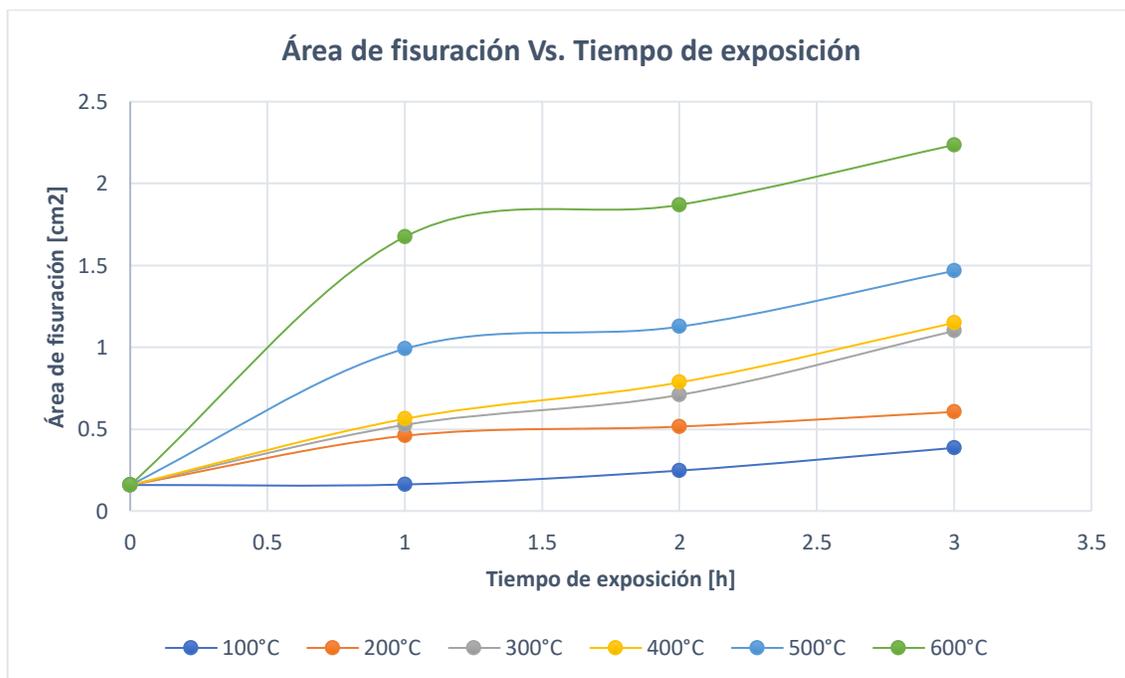


Figura 5.2.: Área de fisuración de cubos de mortero [cm<sup>2</sup>] Vs. Tiempo de exposición [h].

Fuente: (Pérez&Rosero)

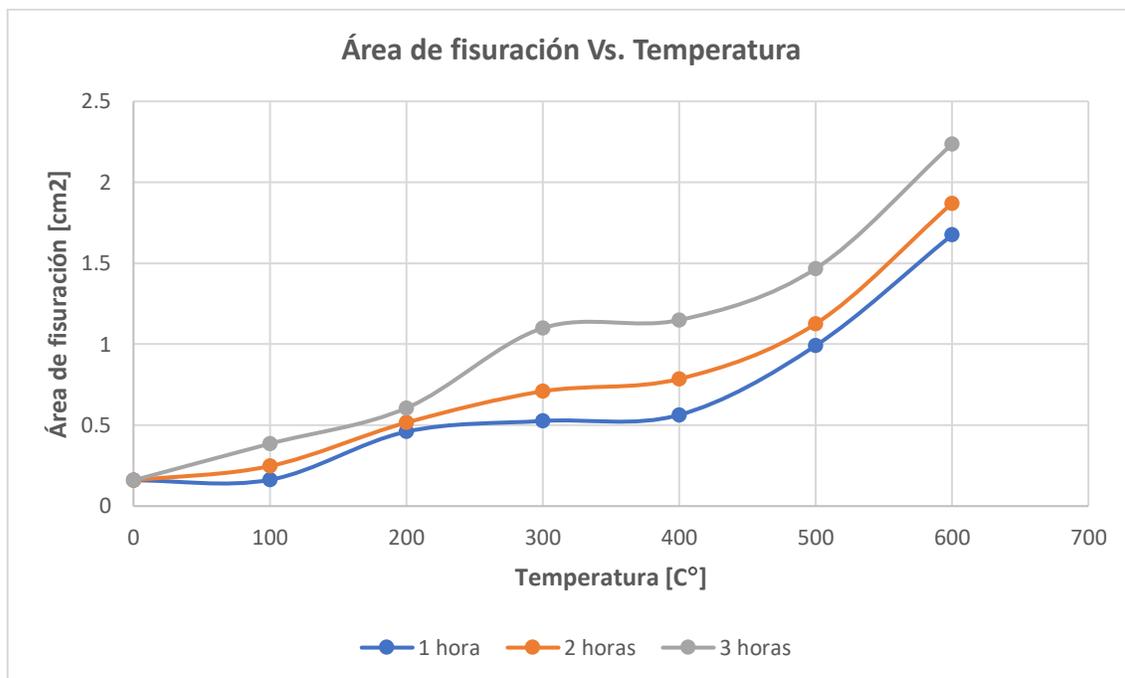


Figura 5.3.: Área de fisuración de cubos de mortero [cm<sup>2</sup>] Vs. Temperatura [°C].

Fuente: (Pérez&Rosero)

Las figuras 5.2 y 5.3 se indica que el área de fisuración incrementa conforme el tiempo de exposición y la temperatura aumenta; es decir, existe una relación directamente proporcional entre el área de fisuración, el tiempo y la temperatura. Partiendo de un área de fisuración inicial de 0.159 cm<sup>2</sup>, se obtiene la mayor afectación en los cubos expuestos a 600°C, durante tres horas con un resultado de 2.235 cm<sup>2</sup>.

#### 5.1.4. RESULTADOS GRÁFICOS DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN F'C EN FUNCIÓN DEL TIEMPO Y DE LA TEMPERATURA EN EXPOSICIÓN

En las siguientes figuras se representa los valores promedios calculados en la tabla 5.3., que hace una relación del tiempo (1h, 2h y 3h) vs resistencia a compresión de los cubos de mortero de 5cm de arista, para cada temperatura (100°, 200°, 300°, 400°, 500° y 600°). La resistencia a compresión f'c [Mpa] y el tiempo en [horas]. Así mismo, se realiza una gráfica de la variación de la resistencia a compresión en función de la temperatura, para cada tiempo de exposición.

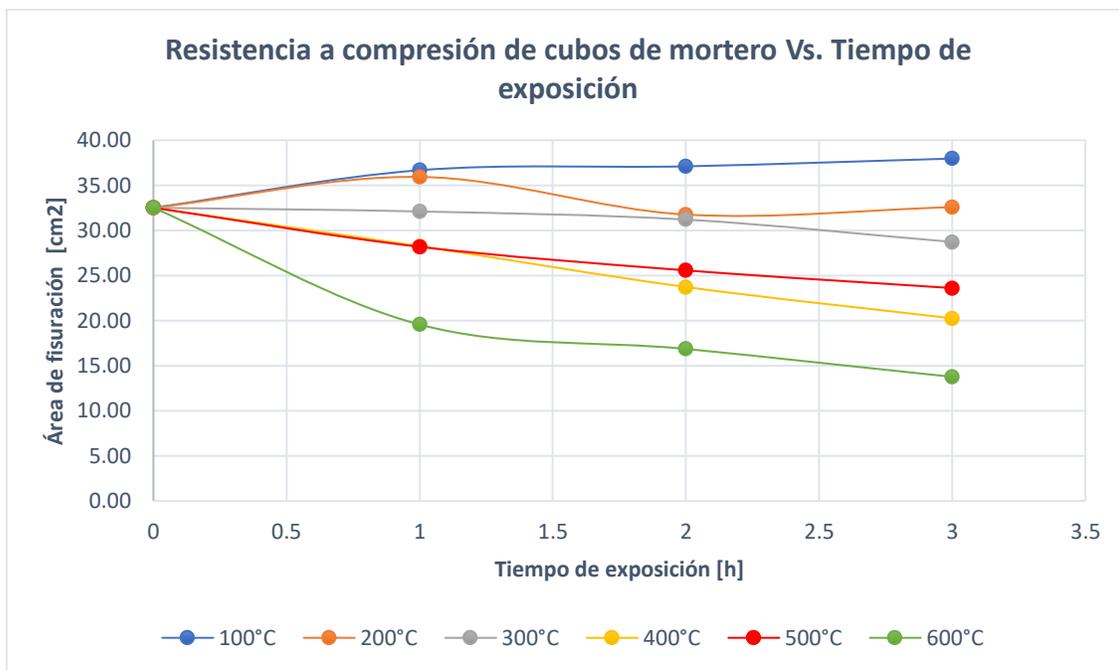


Figura 5.4.: Resistencia a compresión de cubos de mortero [MPa] Vs. Tiempo de exposición [h].

Fuente: (Pérez&Rosero)

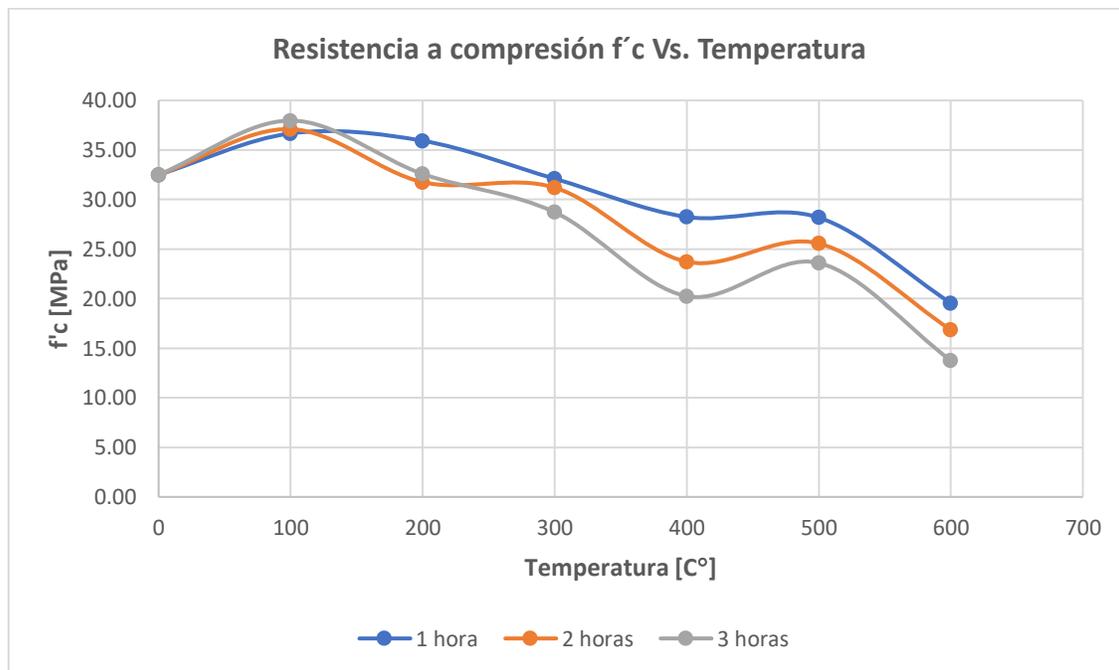


Figura 5.5.: Resistencia a compresión de cubos de mortero [MPa] Vs. Temperatura [°C].

Fuente: (Pérez&Rosero)

Para la comparación de estos resultados se ha partido con una resistencia a compresión inicial de 32.51 MPa. En las figuras 5.4 y 5.5 se muestra que existe un comportamiento decreciente de la resistencia a compresión en función del tiempo de exposición y temperatura, que es aún más pronunciado en los 600°C, obteniendo un valor de 13.76 MPa a las tres horas.

Cabe recalcar el comportamiento contradictorio que se tiene para los 100°C y 200°C, en el que claramente en la mayoría de los casos indica un aumento en la resistencia a compresión. Siendo el más atípico el caso de 100°C a las tres horas con un valor de 32.51 MPa.

#### 5.1.5. RESULTADOS DE LA AFECTACIÓN DEL ÁREA DE FISURAMIENTO

En la tabla 5.4 se presenta los valores del porcentaje de afectación del área de fisuración, que han sido calculados en base a un cubo de mortero de 5cm de arista patrón.

$$\text{Área total} = \text{arista} * \text{arista} * \#\text{caras} \quad (11)$$

$$\text{Área total} = 5 \text{ cm} * 5 \text{ cm} * 6 \text{ caras} = 150 \text{ cm}^2$$

$$\text{Área final del cubo} = \text{Área total} - \text{Área de fisuración promedio} \quad (12)$$

$$\text{Área final del cubo} = 150 \text{ cm}^2 - 0.25 \text{ cm}^2 = 149.75 \text{ cm}^2$$

$$\text{Afectación Área [\%]} = \frac{\text{Área final del cubo} - \text{Área final del cubo patrón}}{\text{Área final del cubo patrón}} * 100 \quad (13)$$

$$\text{Afectación Área [\%]} = \frac{149.75 - 149.84}{149.84} * 100 = 0.06 \%$$

**Tabla 5.4.***Afectación del área de fisuramiento.*

No.	Descripción			Área de Fisuración Promedio [cm <sup>2</sup> ]	Área Final del Cubo [cm <sup>2</sup> ]	Afectación Área [%]
	J5		NATURAL	0.16	149.84	
	H5		NATURAL			
	E5		NATURAL			
1	A1	1	100° 1H	0.16	149.84	0.00
2	B1		100° 1H			
3	C1		100° 1H			
4	D1	2	100° 2H	0.25	149.75	0.06
5	E1		100° 2H			
6	F1		100° 2H			
7	G1	3	100° 3H	0.39	149.61	0.15
8	H1		100° 3H			
9	I1		100° 3H			
10	C2	1	200° 1H	0.46	149.54	0.20
11	D2		200° 1H			
12	E2		200° 1H			
13	A2	2	200° 2H	0.52	149.48	0.24
14	B2		200° 2H			
15	H1		200° 2H			
16	J1	3	200° 3H	0.61	149.39	0.30
17	K1		200° 3H			
18	L1		200° 3H			
19	F2	1	300° 1H	0.53	149.47	0.24
20	G2		300° 1H			
21	H1		300° 1H			
22	I2	2	300° 2H	0.71	149.29	0.37
23	J2		300° 2H			
24	K2		300° 2H			
25	L2	3	300° 3H	1.10	148.90	0.63
26	M2		300° 3H			
27	I5		300° 3H			

Continuación Tabla 5.4. Afectación del área de fisuramiento.

No.	Descripción			Área de Fisuración Promedio [cm <sup>2</sup> ]	Área Final del Cubo [cm <sup>2</sup> ]	Afectación Área [%]
28	B3	1	400° 1H	0.56	149.44	0.27
29	C3		400° 1H			
30	D3		400° 1H			
31	F3	2	400° 2H	0.79	149.21	0.42
32	G3		400° 2H			
33	H3		400° 2H			
34	I3	3	400° 3H	1.15	148.85	0.66
35	J3		400° 3H			
36	H3		400° 3H			
37	K3	1	500° 1H	0.99	149.01	0.56
38	L3		500° 1H			
39	M3		500° 1H			
40	A4	2	500° 2H	1.13	148.87	0.65
41	B4		500° 2H			
42	C4		500° 2H			
43	D4	3	500° 3H	1.47	148.53	0.87
44	E4		500° 3H			
45	F4		500° 3H			
46	G4	1	600° 1H	1.67	148.33	1.01
47	H4		600° 1H			
48	I4		600° 1H			
49	J4	2	600° 2H	1.87	148.13	1.14
50	K4		600° 2H			
51	L4		600° 2H			
52	A5	3	600° 3H	2.24	147.76	1.39
53	B5		600° 3H			
54	M4		600° 3H			

Fuente: (Pérez&amp;Rosero)

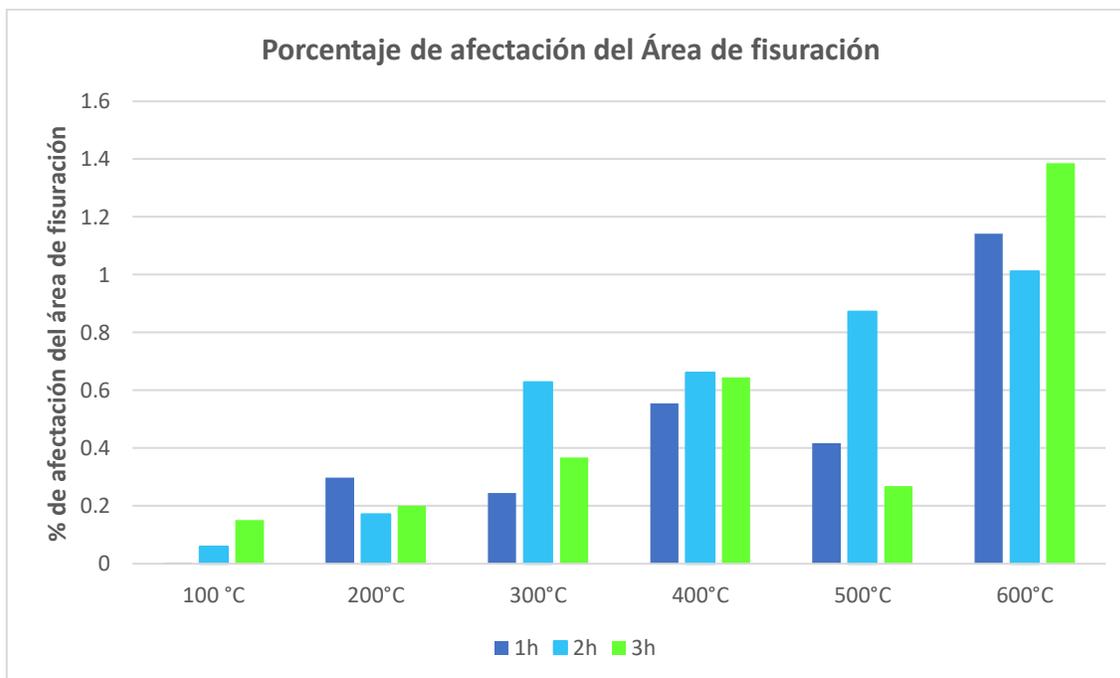


Figura 5.6 Porcentaje de afectación del área de fisuración.

Fuente: (Pérez&Rosero)

El porcentaje de afectación aumenta progresivamente en función de la temperatura y el tiempo, alcanzando una afectación máxima de 1.39% para los 600° tres horas, además se observa que el área de fisuración no es afectada cuando el mortero es expuesto a una temperatura de 100° durante una hora.

#### 5.1.6. RESULTADOS DE LA AFECTACIÓN DE LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN

En la tabla 5.5 se indica el porcentaje de afectación de la resistencia a compresión, que han sido calculados en base a un cubo de mortero de 5cm de arista patrón.

$$\text{Afectación Resistencia [\%]} = \frac{f'c \text{ promedio final} - f'c \text{ promedio final patrón}}{f'c \text{ promedio final patrón}} * 100 \quad (11)$$

$$\text{Afectación Área [\%]} = \frac{36.68 \text{ MPa} - 32.51 \text{ MPa}}{32.51 \text{ MPa}} * 100 = 12.83\%$$

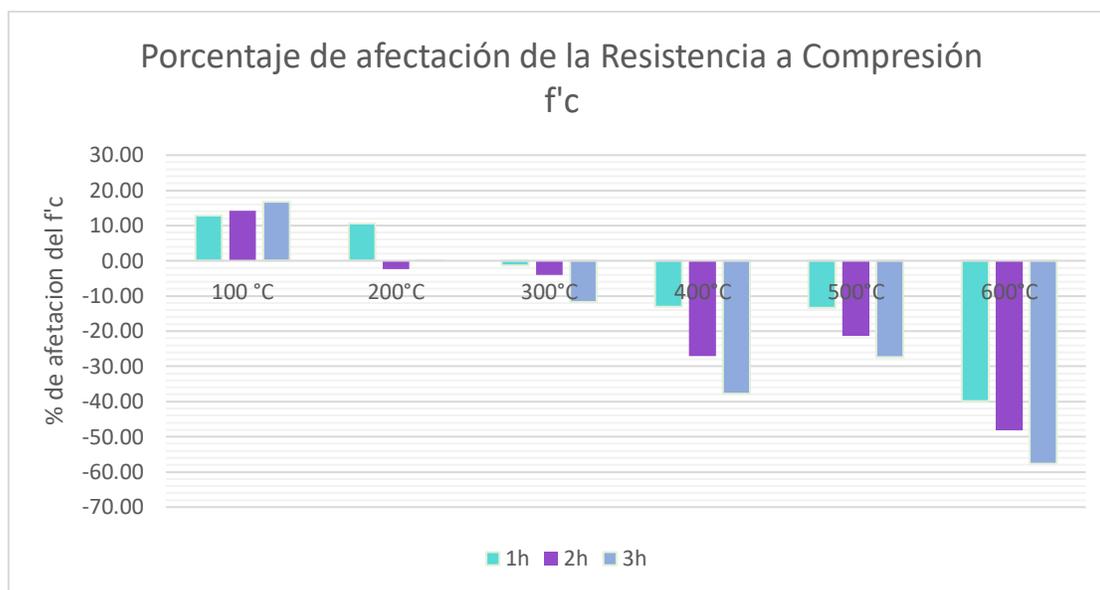
**Tabla 5.5***Afectación de la resistencia a compresión.*

No.	Descripción			f'c Promedio Final [MPa]	Afectación Resistencia [%]
	J5		NATURAL	32.51	
	H5		NATURAL		
	E5		NATURAL		
1	A1	1	100° 1H	36.68	12.83
2	B1		100° 1H		
3	C1		100° 1H		
4	D1	2	100° 2H	37.11	14.15
5	E1		100° 2H		
6	F1		100° 2H		
7	G1	3	100° 3H	37.97	16.80
8	H1		100° 3H		
9	I1		100° 3H		
10	C2	1	200° 1H	35.93	-10.54
11	D2		200° 1H		
12	E2		200° 1H		
13	A2	2	200° 2H	31.76	-2.31
14	B2		200° 2H		
15	H1		200° 2H		
16	J1	3	200° 3H	32.58	0.23
17	K1		200° 3H		
18	L1		200° 3H		
19	F2	1	300° 1H	32.10	-1.25
20	G2		300° 1H		
21	H1		300° 1H		
22	I2	2	300° 2H	31.20	-4.01
23	J2		300° 2H		
24	K2		300° 2H		
25	L2	3	300° 3H	28.72	-11.64
26	M2		300° 3H		
27	I5		300° 3H		
28	B3	1	400° 1H	28.25	-13.11
29	C3		400° 1H		
30	D3		400° 1H		

Continuación Tabla 5.5. Afectación de la resistencia a compresión.

No.	Descripción		f'c Promedio Final [MPa]	Afectación Resistencia [%]
31	F3	2	23.73	-27.01
32	G3			
33	H3			
34	I3	3	20.25	-37.70
35	J3			
36	H3			
37	K3	1	28.18	-13.31
38	L3			
39	M3			
40	A4	2	25.57	-21.34
41	B4			
42	C4			
43	D4	3	23.61	-27.38
44	E4			
45	F4			
46	G4	1	19.56	-39.82
47	H4			
48	I4			
49	J4	2	16.86	-48.14
50	K4			
51	L4			
52	A5	3	13.76	-57.67
53	B5			
54	M4			

Fuente: (Pérez&amp;Rosero)



*Figura 5.7. Porcentaje de afectación de la resistencia a compresión.*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

La norma NTE INEN 2380, señala que la resistencia a compresión mínima es de 28 MPa y el cubo patrón obtuvo una resistencia de 32.51 MPa, por lo tanto, el porcentaje de afectación máximo aceptable es -14.05%.

Para los cubos expuestos a partir de los 400° dos horas el porcentaje de afectación supera el -14.05% admisible.

## **5.2. RELACIÓN MATEMÁTICA ENTRE EL PORCENTAJE DEL ÁREA DE FISURAMIENTO CON LA RESISTENCIA A COMPRESIÓN DEL MORTERO**

La relación entre el área de fisuramiento y la resistencia a compresión de los cubos de mortero se basa en la aplicación de dos gráficas para cada una de las temperaturas, la primera nos indica la relación entre el tiempo y el área de fisuración y la segunda el área de fisuración con la resistencia a compresión.

Para una aplicación práctica, en estimación del comportamiento estructural del mortero afectado por un incendio es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Conocer dos datos iniciales del tiempo y la temperatura alcanzada en el incendio.
2. Seleccionar el par de gráficas correspondiente a la temperatura.
3. Con el tiempo ingresar a la gráfica de la relación entre el tiempo y el área de fisuración.
4. Determinar el área de fisuración con la ecuación de la gráfica.
5. Reemplazar el área de fisuración obtenida en la ecuación de la gráfica que relaciona el área de fisuración con la resistencia a compresión.
6. Estimar el valor de la resistencia a compresión.

Con este proceso se puede establecer con cierto grado de certeza la resistencia a compresión del mortero después de haber sido afectado por el incendio.

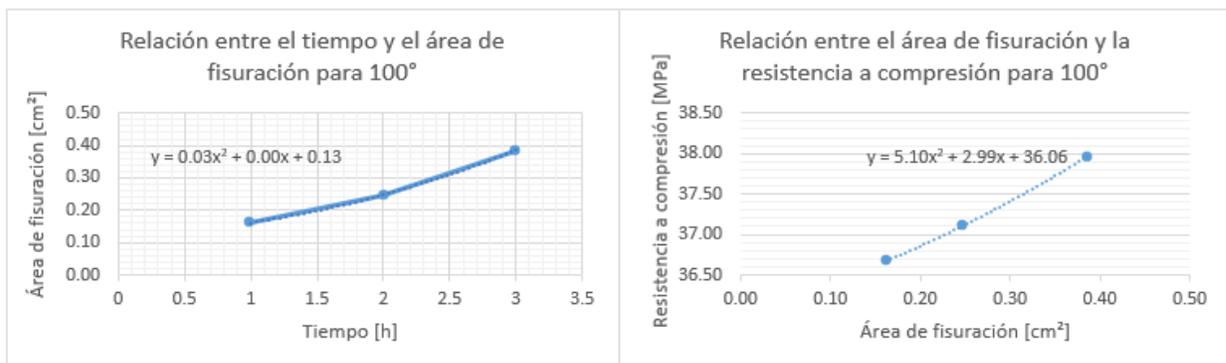


Figura 5.8: Relación de las propiedades del mortero para 100°.

Fuente: (Pérez&Rosero)

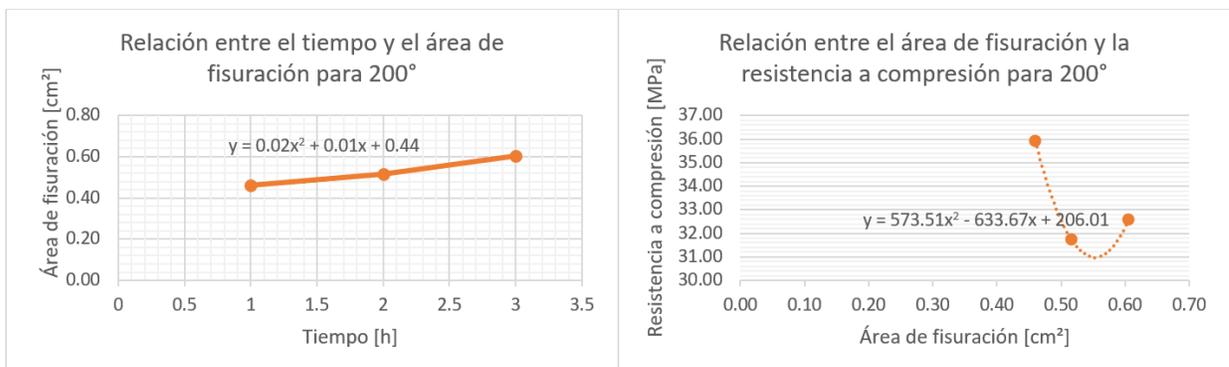


Figura 5.9: Relación de las propiedades del mortero para 200°.

Fuente: (Pérez&Rosero)

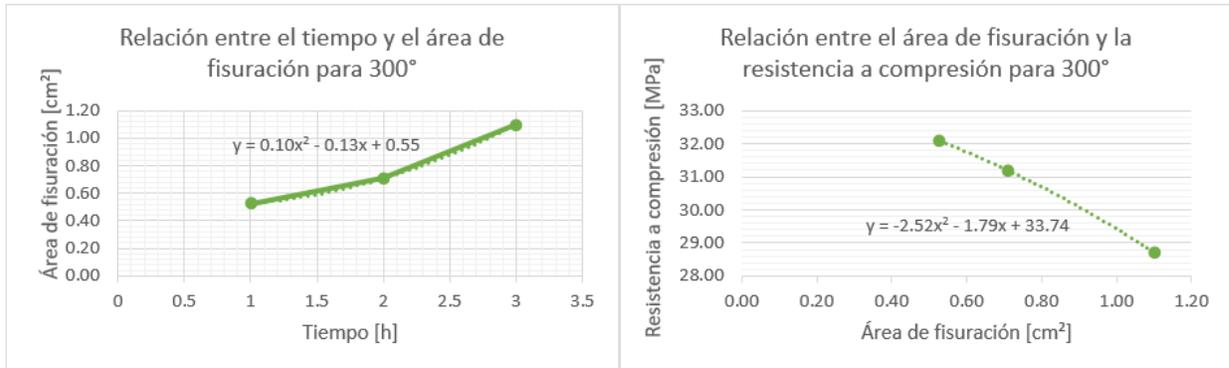


Figura 5.10 Relación de las propiedades del mortero para 300°.

Fuente: (Pérez&Rosero)

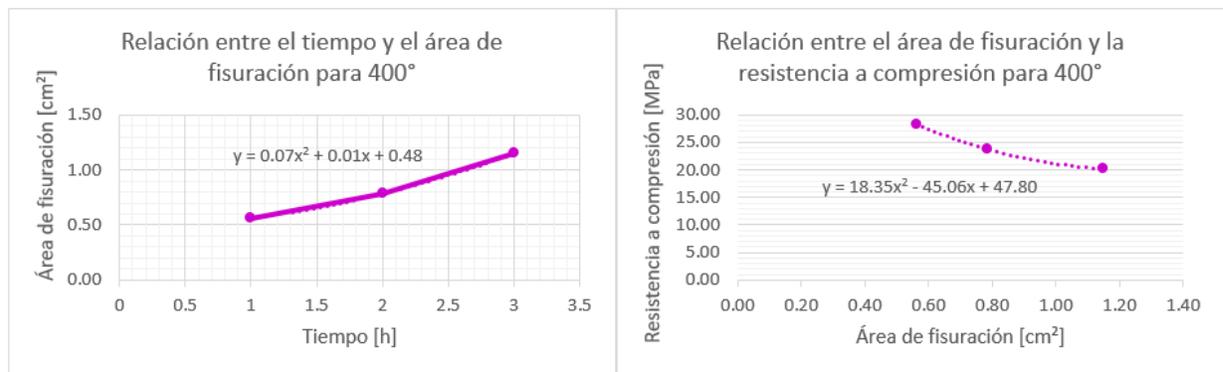


Figura 5.11: Relación de las propiedades del mortero para 400°.

Fuente: (Pérez&Rosero)

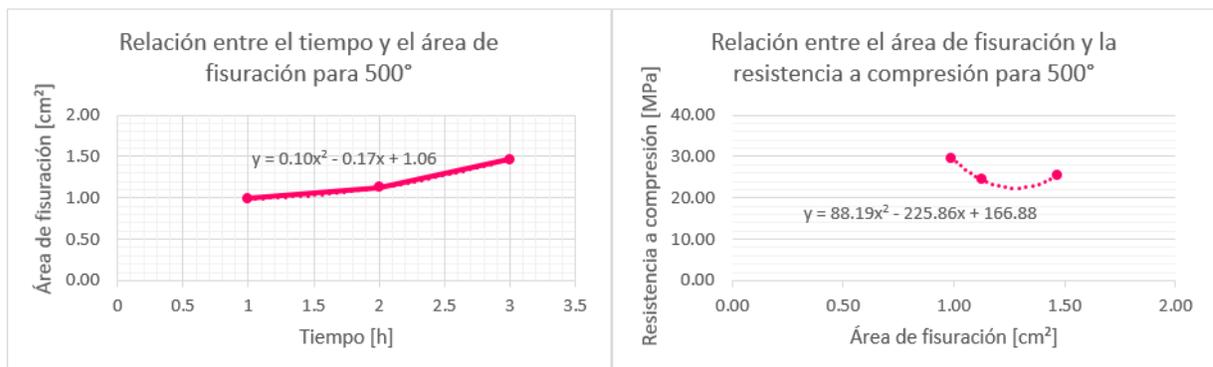


Figura 5.12: Relación de las propiedades del mortero para 500°.

Fuente: (Pérez&Rosero)

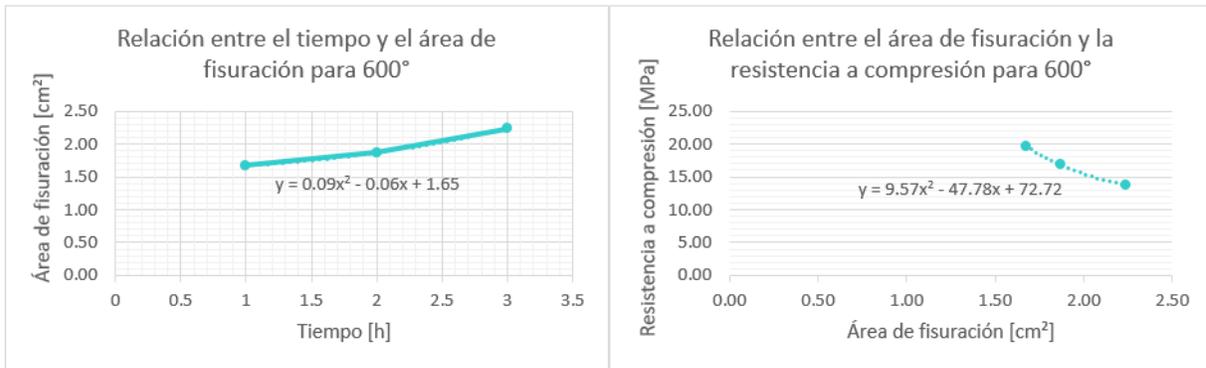


Figura 5.13: Relación de las propiedades del mortero para 600°.

Fuente: (Pérez&Rosero)

### 5.3. PROPIEDADES DE VARILLAS DE ACERO

#### 5.3.1. RESISTENCIA A TRACCIÓN

La tabla 5.6 muestra los resultados de la resistencia a tracción que fueron generados por ensayos en el Laboratorio de Ensayos de Materiales, Suelos y Rocas (LEMSUR), basándose para el cálculo en la norma NTE INEN ISO 6892-1 "Materiales metálicos – ensayo de tracción – parte 1: método de ensayo a temperatura ambiente."

Para que los valores del mismo rango no discrepen se procedió a calcular una desviación estándar y así encontrar valores estadísticamente aceptables. Para así determinar un nuevo promedio con el que se podrá realizar el análisis. Este proceso se realizó para cada una de las propiedades de estudio.

**Tabla 5.6.***Resistencia a tracción de varillas de acero.*

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Esfuerzo máximo	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Normal 1	17	0	0	629.81	633.14	5.77	627.37	638.91	629.81	629.81
Normal 2				629.81					629.81	
Normal 3				639.80						
300 1h 7cm (1)	300	1	3	633.35	632.11	3.61	628.50	635.72	633.35	634.14
300 1h 7cm (2)				634.94					634.94	
300 1h 7cm (3)				628.04						
300 1h 9cm (1)	300	1	4	628.84	630.84	6.77	624.07	637.61	628.84	627.07
300 1h 9cm (2)				638.39					625.30	
300 1h 9cm (3)				625.30						
300 1h 11 cm (1)	300	1	5	631.76	628.90	8.88	620.01	637.78	631.76	633.88
300 1h 11cm (2)				636.00					636.00	
300 1h 11 cm (3)				618.93						
300 2h 7cm (1)	300	2	3	633.61	629.54	3.55	625.99	633.09		627.51
300 2h 7cm (2)				627.07					627.07	
300 2h 7cm (3)				627.95					627.95	
300 2h 9cm (1)	300	2	4	630.69	629.63	1.54	628.09	631.17	630.69	630.52
300 2h 9cm (2)				627.86						
300 2h 9cm (3)				630.34					630.34	

Continuación Tabla 5.6. Resistencia a tracción de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Esfuerzo máximo	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
300 2h 11 cm (1)	300	2	5	637.06	639.54	6.30	633.24	645.84	637.06	635.96
300 2h 11cm (2)				634.85					634.85	
300 2h 11 cm (3)				646.70						
300 3h 7cm (1)	300	3	3	623.18	629.31	5.35	623.96	634.65		632.37
300 3h 7cm (2)				631.76					631.76	
300 3h 7cm (3)				632.99					632.99	
300 3h 9cm (1)	300	3	4	631.49	630.22	3.58	626.65	633.80	631.49	632.24
300 3h 9cm (2)				626.18						
300 3h 9cm (3)				632.99					632.99	
300 3h 11 cm (1)	300	3	5	631.58	632.05	1.90	630.15	633.95	631.58	631.00
300 3h 11cm (2)				630.43					630.43	
300 3h 11 cm (3)				634.14						
600 1h 7cm (1)	600	1	3	558.19	564.06	17.34	546.72	581.39	558.19	554.30
600 1h 7cm (2)				550.41					550.41	
600 1h 7cm (3)				583.57						
600 1h 9cm (1)	600	1	4	611.42	620.73	9.16	611.58	629.89		625.39
600 1h 9cm (2)				629.72					629.72	
600 1h 9cm (3)				621.06					621.06	

Continuación Tabla 5.6. Resistencia a tracción de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Esfuerzo máximo	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
600 1h 11 cm (1)	600	1	5	622.03	631.81	10.44	621.37	642.26	622.03	626.32
600 1h 11cm (2)				630.61					630.61	
600 1h 11 cm (3)				642.81						
600 2h 7cm (1)	600	2	3		548.33	12.57	535.76	560.90		548.33
600 2h 7cm (2)				557.22					557.22	
600 2h 7cm (3)				539.45					539.45	
600 2h 9cm (1)	600	2	4	605.32	600.84	10.14	590.69	610.98	605.32	606.64
600 2h 9cm (2)				589.23						
600 2h 9cm (3)				607.97					607.97	
600 2h 11 cm (1)	600	2	5	608.32	620.79	10.93	609.86	631.72		627.02
600 2h 11cm (2)				625.30					625.30	
600 2h 11 cm (3)				628.75					628.75	
600 3h 7cm (1)	600	3	3	542.54	556.75	12.39	544.35	569.14		563.85
600 3h 7cm (2)				565.35					565.35	
600 3h 7cm (3)				562.35					562.35	
600 3h 9cm (1)	600	3	4	612.75	601.31	14.01	587.30	615.31	612.75	609.12
600 3h 9cm (2)				585.69						
600 3h 9cm (3)				605.49					605.49	

Continuación Tabla 5.6. Resistencia a tracción de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Esfuerzo máximo	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
600 3h 11 cm (1)	600	3	5	624.24	619.38	6.88	612.50	626.25	624.24	624.24
600 3h 11cm (2)										
600 3h 11 cm (3)				614.51						
900 1h 7cm (1)	900	1	3	511.06	501.93	8.43	493.49	510.36		497.36
900 1h 7cm (2)				494.44					494.44	
900 1h 7cm (3)				500.28					500.28	
900 1h 9cm (1)	900	1	4	518.84	512.36	6.83	505.53	519.19	518.84	515.93
900 1h 9cm (2)				513.01					513.01	
900 1h 9cm (3)				505.23						
900 1h 11 cm (1)	900	1	5	520.08	516.49	3.24	513.25	519.72		514.69
900 1h 11cm (2)				515.57					515.57	
900 1h 11 cm (3)				513.80					513.80	
900 2h 7cm (1)	900	2	3	493.56	492.26	5.68	486.58	497.94	493.56	495.37
900 2h 7cm (2)				497.18					497.18	
900 2h 7cm (3)				486.04						
900 2h 9cm (1)	900	2	4	496.39	496.09	5.49	490.60	501.58	496.39	498.91
900 2h 9cm (2)				490.46						
900 2h 9cm (3)				501.43					501.43	

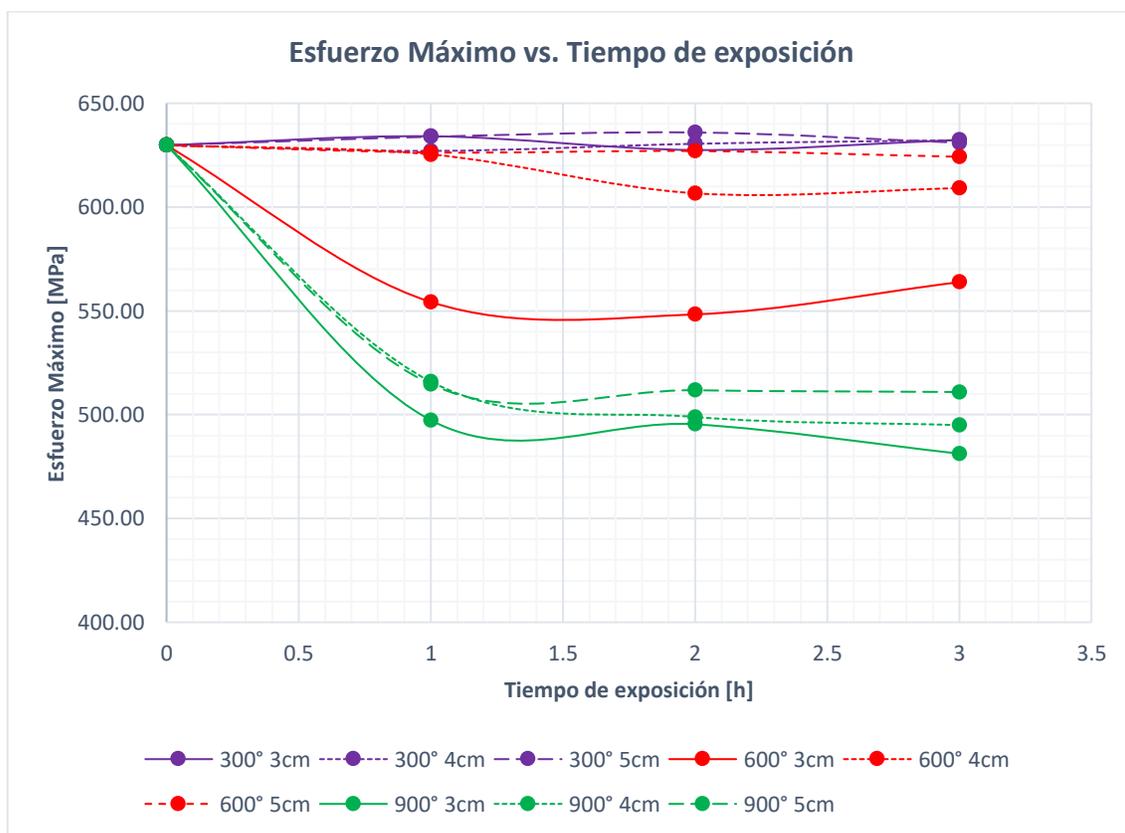
Continuación Tabla 5.6. Resistencia a tracción de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Esfuerzo máximo	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
900 2h 11 cm (1)	900	2	5	504.87	509.47	4.12	505.35	513.59		511.77
900 2h 11cm (2)				510.71					510.71	
900 2h 11 cm (3)				512.83					512.83	
900 3h 7cm (1)	900	3	3	481.88	482.42	2.17	480.24	484.59	481.88	481.22
900 3h 7cm (2)				480.56					480.56	
900 3h 7cm (3)				484.80						
900 3h 9cm (1)	900	3	4	486.48	492.14	5.01	487.13	497.16		494.97
900 3h 9cm (2)				493.91					493.91	
900 3h 9cm (3)				496.03					496.03	
900 3h 11 cm (1)	900	3	5	501.16	507.67	5.69	501.98	513.36		510.93
900 3h 11cm (2)				511.68					511.68	
900 3h 11 cm (3)				510.18					510.18	

Fuente: (Pérez&amp;Rosero)

### 5.3.2. RESULTADO GRÁFICO DE LA RESISTENCIA A TRACCIÓN EN FUNCIÓN DEL TIEMPO, TEMPERATURA Y RECUBRIMIENTO.

Las siguientes gráficas se obtuvieron de los valores promedios encontrados en la tabla 5.6. en la cual se relaciona el esfuerzo máximo de las varillas de acero de 12 mm de diámetro, con el tiempo (1h, 2h y 3h), la temperatura (300°C, 600°C y 900°C) y el recubrimiento (3cm, 4cm y 5cm). El esfuerzo máximo está expresado en [MPa].



*Figura 5.14 Esfuerzo máximo de varillas de acero [MPa] Vs. Tiempo exposición [h].*

*Fuente: (Pérez&Rosero)*

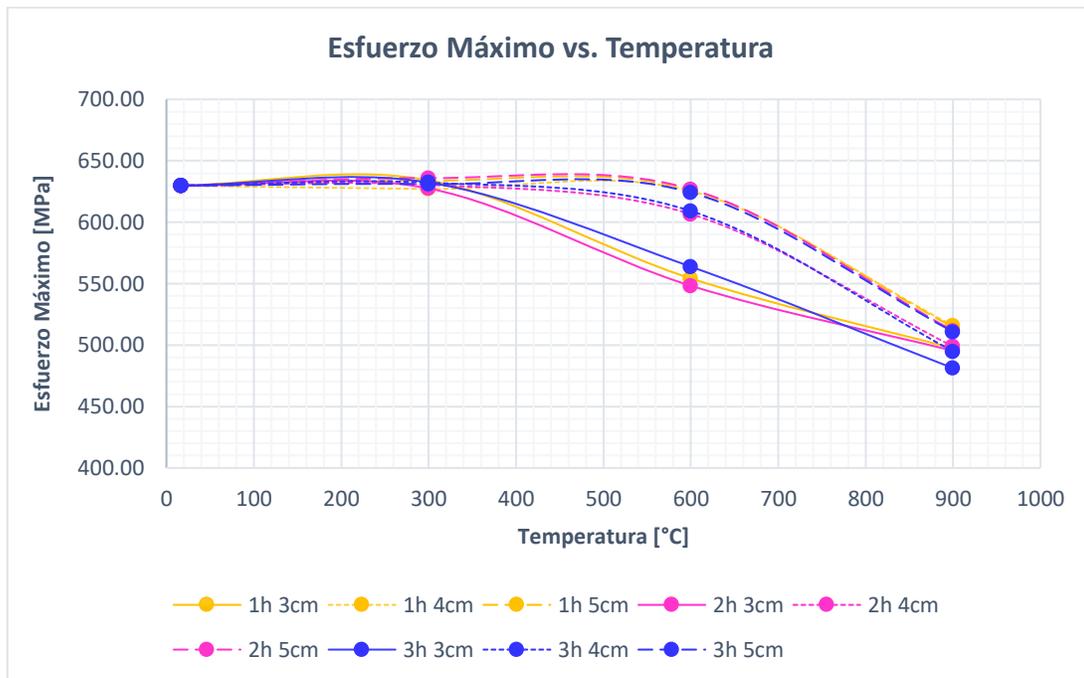


Figura 5.15 Esfuerzo máximo de varillas de acero [MPa] Vs. Temperatura [°C].

Fuente: (Pérez&Rosero)



Figura 5.16 Esfuerzo máximo de varillas de acero [MPa] Vs. Recubrimiento [cm].

Fuente: (Pérez&Rosero)

En las figuras 5.14 y 5.15 se evidencia que hasta los 300°C durante (1h, 2h y 3h) de exposición, con todos los recubrimientos analizados, el esfuerzo máximo no sufre cambios notorios comparado con el esfuerzo máximo patrón. A los 600°C el esfuerzo máximo ya se ve afectado por la temperatura y el recubrimiento, teniendo una mayor afectación para el menor de los recubrimientos. Para el caso de los 900°C el esfuerzo máximo decae notoriamente, que incluso el recubrimiento ya no cumple la función de proteger al acero.

### **5.3.3.DUCTILIDAD**

La tabla 5.7 indica los resultados de la ductilidad que fueron calculados en base a información del Laboratorio de Ensayos de Materiales, Suelos y Rocas (LEMSUR), basándose para el cálculo en la norma NTE INEN ISO 6892-1 “Materiales metálicos – ensayo de tracción – parte 1: Método de ensayo a temperatura ambiente.”

**Tabla 5.7***Ductilidad de varillas de acero.*

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Ductilidad	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Normal 1	17	0	0	13.65	14.00	0.32	13.68	14.33		14.18
Normal 2				14.08					14.08	
Normal 3				14.28					14.28	
300 1h 7cm (1)	300	1	3	13.97	14.18	0.21	13.97	14.39	13.97	14.07
300 1h 7cm (2)				14.39						
300 1h 7cm (3)				14.17					14.17	
300 1h 9cm (1)	300	1	4	13.96	13.64	0.36	13.28	14.00	13.96	13.84
300 1h 9cm (2)				13.71					13.71	
300 1h 9cm (3)				13.25						
300 1h 11 cm (1)	300	1	5	14.20	13.66	0.51	13.14	14.17		13.39
300 1h 11cm (2)				13.18					13.18	
300 1h 11 cm (3)				13.60					13.60	
300 2h 7cm (1)	300	2	3	13.67	13.90	0.46	13.44	14.35	13.67	13.63
300 2h 7cm (2)				13.60					13.60	
300 2h 7cm (3)				14.42						
300 2h 9cm (1)	300	2	4	14.26	14.20	0.90	13.30	15.10	14.26	14.66
300 2h 9cm (2)				13.27						
300 2h 9cm (3)				15.06					15.06	

Continuación Tabla 5.7. Ductilidad de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Ductilidad	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
300 2h 11 cm (1)	300	2	5	13.56	13.89	0.85	13.05	14.74	13.56	13.41
300 2h 11cm (2)				14.86						
300 2h 11 cm (3)				13.26					13.26	
300 3h 7cm (1)	300	3	3	13.77	13.55	0.20	13.34	13.75		13.44
300 3h 7cm (2)				13.50					13.50	
300 3h 7cm (3)				13.37					13.37	
300 3h 9cm (1)	300	3	4	13.94	14.09	0.51	13.57	14.60	13.94	13.80
300 3h 9cm (2)				13.67					13.67	
300 3h 9cm (3)				14.66						
300 3h 11 cm (1)	300	3	5	13.90	14.43	0.49	13.95	14.92		14.70
300 3h 11cm (2)				14.53					14.53	
300 3h 11 cm (3)				14.86					14.86	
600 1h 7cm (1)	600	1	3	13.43	13.65	0.20	13.45	13.85		13.76
600 1h 7cm (2)				13.73					13.73	
600 1h 7cm (3)				13.80					13.80	
600 1h 9cm (1)	600	1	4	15.00	14.63	0.38	14.25	15.01	15.00	14.82
600 1h 9cm (2)				14.24						
600 1h 9cm (3)				14.64					14.64	

Continuación Tabla 5.7. Ductilidad de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Ductilidad	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
600 1h 11 cm (1)	600	1	5	14.54	13.97	0.52	13.45	14.49		13.69
600 1h 11cm (2)				13.51					13.51	
600 1h 11 cm (3)				13.88					13.88	
600 2h 7cm (1)	600	2	3		13.17	0.51	12.66	13.68		13.17
600 2h 7cm (2)				13.53					13.53	
600 2h 7cm (3)				12.81					12.81	
600 2h 9cm (1)	600	2	4	13.87	13.47	0.47	13.00	13.93	13.87	13.72
600 2h 9cm (2)				12.95						
600 2h 9cm (3)				13.58					13.58	
600 2h 11 cm (1)	600	2	5	13.67	13.78	0.91	12.87	14.68	13.67	13.30
600 2h 11cm (2)				14.73						
600 2h 11 cm (3)				12.93					12.93	
600 3h 7cm (1)	600	3	3	14.86	13.86	0.89	12.96	14.75		13.36
600 3h 7cm (2)				13.56					13.56	
600 3h 7cm (3)				13.15					13.15	
600 3h 9cm (1)	600	3	4	13.19	14.15	0.91	13.24	15.06		14.63
600 3h 9cm (2)				14.25					14.25	
600 3h 9cm (3)				15.00					15.00	

Continuación Tabla 5.7. Ductilidad de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Ductilidad	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
600 3h 11 cm (1)	600	3	5	14.92	14.74	0.25	14.49	15.00	14.92	14.74
600 3h 11cm (2)										
600 3h 11 cm (3)				14.56					14.56	
900 1h 7cm (1)	900	1	3	15.91	17.03	0.98	16.04	18.01		17.58
900 1h 7cm (2)				17.40					17.40	
900 1h 7cm (3)				17.77					17.77	
900 1h 9cm (1)	900	1	4	16.28	16.56	0.58	15.98	17.13	16.28	16.23
900 1h 9cm (2)				16.18					16.18	
900 1h 9cm (3)				17.22						
900 1h 11 cm (1)	900	1	5	16.87	16.48	0.63	15.85	17.10	16.87	16.84
900 1h 11cm (2)				16.81					16.81	
900 1h 11 cm (3)				15.75						
900 2h 7cm (1)	900	2	3	16.97	17.64	0.97	16.67	18.61	16.97	17.08
900 2h 7cm (2)				17.20					17.20	
900 2h 7cm (3)				18.75						
900 2h 9cm (1)	900	2	4	16.58	17.43	0.73	16.69	18.16		17.85
900 2h 9cm (2)				17.78					17.78	
900 2h 9cm (3)				17.92					17.92	

Continuación Tabla 5.7. Ductilidad de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Ductilidad	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
900 2h 11 cm (1)	900	2	5	17.63	17.28	0.33	16.96	17.61		17.11
900 2h 11cm (2)				17.23					17.23	
900 2h 11 cm (3)				16.99					16.99	
900 3h 7cm (1)	900	3	3	17.85	17.43	0.46	16.97	17.90	17.85	17.68
900 3h 7cm (2)				17.52					17.52	
900 3h 7cm (3)				16.94						
900 3h 9cm (1)	900	3	4	17.50	16.78	0.63	16.16	17.41		16.42
900 3h 9cm (2)				16.35					16.35	
900 3h 9cm (3)				16.50					16.50	
900 3h 11 cm (1)	900	3	5	18.03	17.46	0.50	16.96	17.96		17.18
900 3h 11cm (2)				17.25					17.25	
900 3h 11 cm (3)				17.10					17.10	

Fuente: (Pérez&amp;Rosero)

### 5.3.4. RESULTADO GRÁFICO DE LA DUCTILIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO, TEMPERATURA Y RECUBRIMIENTO.

A partir de la tabla 5.7 se realizaron las posteriores gráficas, que analiza la ductilidad de las varillas de acero en [%], con el tiempo (1h, 2h y 3h), la temperatura (300°C, 600°C y 900°C) y el recubrimiento (3cm, 4cm y 5cm).

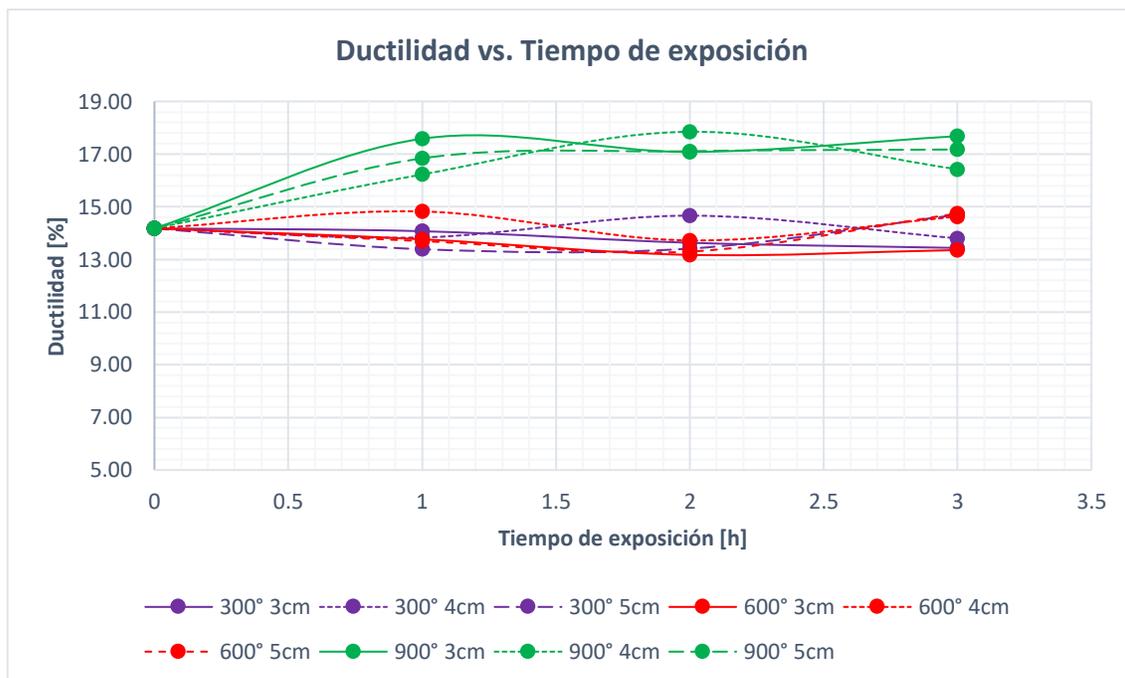


Figura 5.17 Ductilidad de varillas de acero [%] Vs. Tiempo de exposición [h].

Fuente: (Pérez&Rosero)

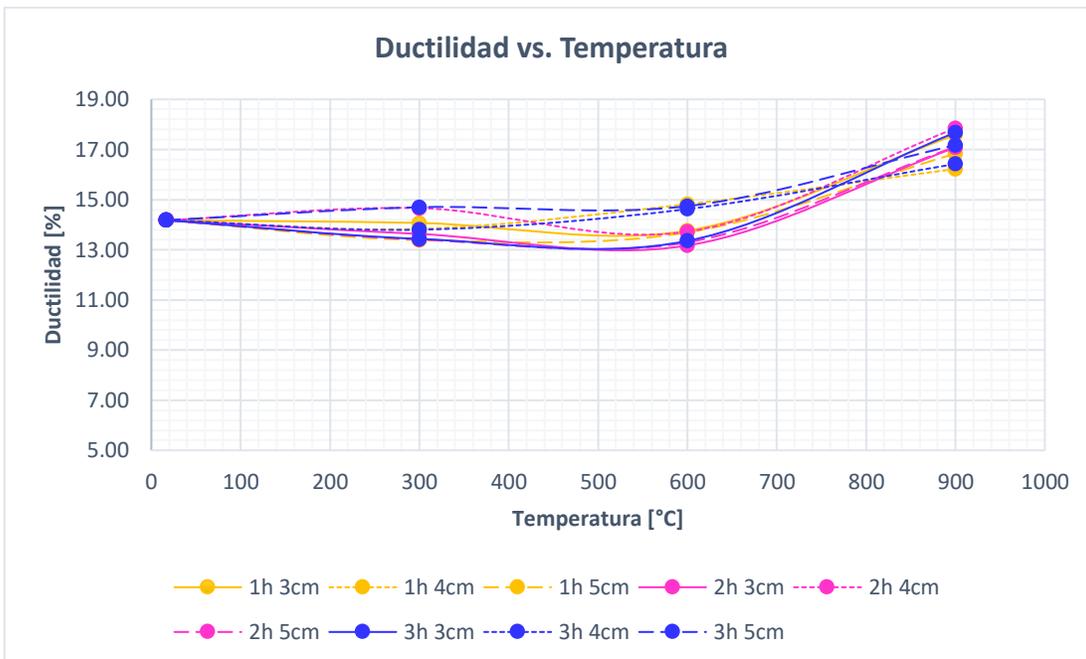


Figura 5.18 Ductilidad de varillas de acero [%] Vs. Temperatura [°C].

Fuente: (Pérez&Rosero)

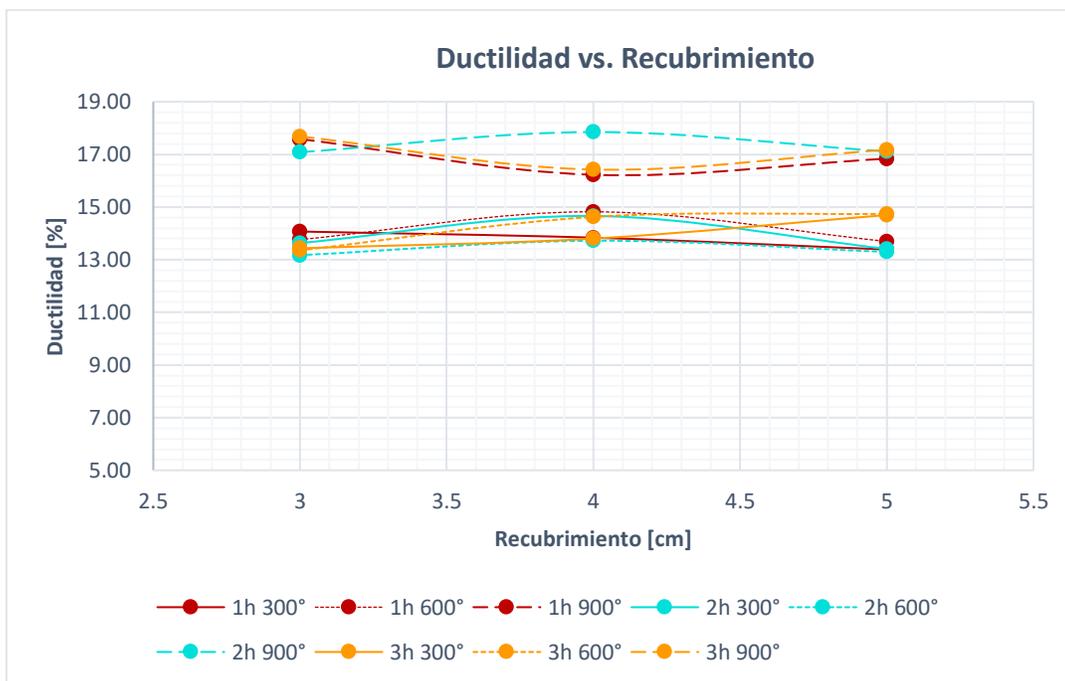


Figura 5.19 Ductilidad de varillas de acero [%] Vs. Recubrimiento [cm].

Fuente: (Pérez&Rosero)

Partiendo de un valor patrón de ductilidad de 14.18%, se observa cambios evidenciables a los 900°C, con su máximo valor de 17.18% correspondiente a las tres horas de exposición. En los 300°C y 600°C los cambios en la ductilidad no son muy significativos, no existe una clara relación de cómo influye el recubrimiento en el cambio de comportamiento de esta propiedad.

### **5.3.5.ESFUERZO DE FLUENCIA**

En la tabla 5.8 se encuentran los resultados del esfuerzo de fluencia obtenidos de los informes del Laboratorio de Ensayo de Materiales, Mecánica de Suelos y Rocas, basándose para el cálculo en la norma NTE INEN ISO 6892-1.

**Tabla 5.8***Esfuerzo de fluencia de varillas de acero.*

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Esfuerzo de fluencia	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Normal 1	17	0	0	434.40	436.02	2.81	433.22	438.83	434.40	434.40
Normal 2				434.40					434.40	
Normal 3				439.27						
300 1h 7cm (1)	300	1	3	428.48	427.95	1.08	426.87	429.02	428.48	428.57
300 1h 7cm (2)				426.71						
300 1h 7cm (3)				428.66					428.66	
300 1h 9cm (1)	300	1	4	428.66	440.95	21.36	419.58	462.31	428.66	428.61
300 1h 9cm (2)				465.62						
300 1h 9cm (3)				428.57					428.57	
300 1h 11 cm (1)	300	1	5	442.10	427.36	12.76	414.60	440.12		419.99
300 1h 11cm (2)				419.99					419.99	
300 1h 11 cm (3)				419.99					419.99	
300 2h 7cm (1)	300	2	3	460.49	449.61	9.54	440.07	459.16		444.17
300 2h 7cm (2)				442.63					442.63	
300 2h 7cm (3)				445.72					445.72	
300 2h 9cm (1)	300	2	4	429.72	436.70	13.42	423.28	450.12	429.72	428.97
300 2h 9cm (2)				452.18						
300 2h 9cm (3)				428.21					428.21	

Continuación Tabla 5.8. Esfuerzo de fluencia de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Esfuerzo de fluencia	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
300 2h 11 cm (1)	300	2	5	432.37	430.54	14.94	415.60	445.48	432.37	438.43
300 2h 11cm (2)				414.77						
300 2h 11 cm (3)				444.48					444.48	
300 3h 7cm (1)	300	3	3	433.61	440.65	8.47	432.18	449.12	433.61	435.95
300 3h 7cm (2)				450.05						
300 3h 7cm (3)				438.29					438.29	
300 3h 9cm (1)	300	3	4	439.36	438.35	0.97	437.38	439.33		437.85
300 3h 9cm (2)				437.41					437.41	
300 3h 9cm (3)				438.29					438.29	
300 3h 11 cm (1)	300	3	5	431.31	428.89	5.95	422.94	434.84	431.31	432.28
300 3h 11cm (2)				422.11						
300 3h 11 cm (3)				433.25					433.25	
600 1h 7cm (1)	600	1	3	437.85	429.36	21.04	408.32	450.41	437.85	441.34
600 1h 7cm (2)				405.40						
600 1h 7cm (3)				444.84					444.84	
600 1h 9cm (1)	600	1	4	431.49	429.78	2.66	427.12	432.44	431.49	431.31
600 1h 9cm (2)				426.71						
600 1h 9cm (3)				431.13					431.13	

Continuación Tabla 5.8. Esfuerzo de fluencia de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Esfuerzo de fluencia	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
600 1h 11 cm (1)	600	1	5	444.93	429.60	13.49	416.11	443.09		421.94
600 1h 11cm (2)				419.55					419.55	
600 1h 11 cm (3)				424.32					424.32	
600 2h 7cm (1)	600	2	3		410.04	19.57	390.47	429.61		410.04
600 2h 7cm (2)				423.88					423.88	
600 2h 7cm (3)				396.21					396.21	
600 2h 9cm (1)	600	2	4	432.90	425.03	6.99	418.04	432.02		421.10
600 2h 9cm (2)				419.55					419.55	
600 2h 9cm (3)				422.64					422.64	
600 2h 11 cm (1)	600	2	5	460.66	448.96	10.58	438.38	459.55		443.11
600 2h 11cm (2)				440.06					440.06	
600 2h 11 cm (3)				446.16					446.16	
600 3h 7cm (1)	600	3	3	399.65	408.03	15.82	392.21	423.84	399.65	398.90
600 3h 7cm (2)				398.15					398.15	
600 3h 7cm (3)				426.27						
600 3h 9cm (1)	600	3	4	438.21	435.91	7.26	428.64	443.17	438.21	439.97
600 3h 9cm (2)				441.74					441.74	
600 3h 9cm (3)				427.77						

Continuación Tabla 5.8. Esfuerzo de fluencia de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Esfuerzo de fluencia	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
600 3h 11 cm (1)	600	3	5	455.80	454.47	1.88	452.60	456.35	455.80	455.80
600 3h 11cm (2)										
600 3h 11 cm (3)				453.15						
900 1h 7cm (1)	900	1	3	331.66	309.61	22.24	287.37	331.85	331.66	320.83
900 1h 7cm (2)				287.19						
900 1h 7cm (3)				310.00						
900 1h 9cm (1)	900	1	4	340.06	329.48	11.13	318.35	340.61	340.06	335.29
900 1h 9cm (2)				330.51						
900 1h 9cm (3)				317.87						
900 1h 11 cm (1)	900	1	5	358.72	343.30	14.19	329.11	357.49		335.60
900 1h 11cm (2)				330.78					330.78	
900 1h 11 cm (3)				340.41					340.41	
900 2h 7cm (1)	900	2	3	304.96	301.77	5.44	296.34	307.21	304.96	304.91
900 2h 7cm (2)				295.50						
900 2h 7cm (3)				304.87					304.87	
900 2h 9cm (1)	900	2	4	303.81	296.71	8.95	287.76	305.65	303.81	301.73
900 2h 9cm (2)				286.66						
900 2h 9cm (3)				299.65					299.65	

Continuación Tabla 5.8. Esfuerzo de fluencia de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Esfuerzo de fluencia	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
900 2h 11 cm (1)	900	2	5	284.00	299.27	17.46	281.81	316.73	284.00	289.75
900 2h 11cm (2)				318.31						
900 2h 11 cm (3)				295.50					295.50	
900 3h 7cm (1)	900	3	3	303.10	293.70	8.93	284.77	302.63		289.00
900 3h 7cm (2)				285.33					285.33	
900 3h 7cm (3)				292.67					292.67	
900 3h 9cm (1)	900	3	4	309.29	299.27	9.16	290.11	308.43		294.26
900 3h 9cm (2)				291.34					291.34	
900 3h 9cm (3)				297.18					297.18	
900 3h 11 cm (1)	900	3	5	299.39	312.00	12.22	299.78	324.22		318.31
900 3h 11cm (2)				323.79					323.79	
900 3h 11 cm (3)				312.83					312.83	

Fuente: (Pérez&amp;Rosero)

### 5.3.6. RESULTADO GRÁFICO DEL ESFUERZO DE FLUENCIA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO, TEMPERATURA Y RECUBRIMIENTO.

En base a los datos de la tabla 5.8 se obtienen las siguientes gráficas, que permiten hacer un análisis del esfuerzo de fluencia [MPa], con el tiempo de exposición (1h, 2h y 3h), la temperatura (300°C, 600°C y 900°C) y el recubrimiento (3cm, 4cm y 5cm).

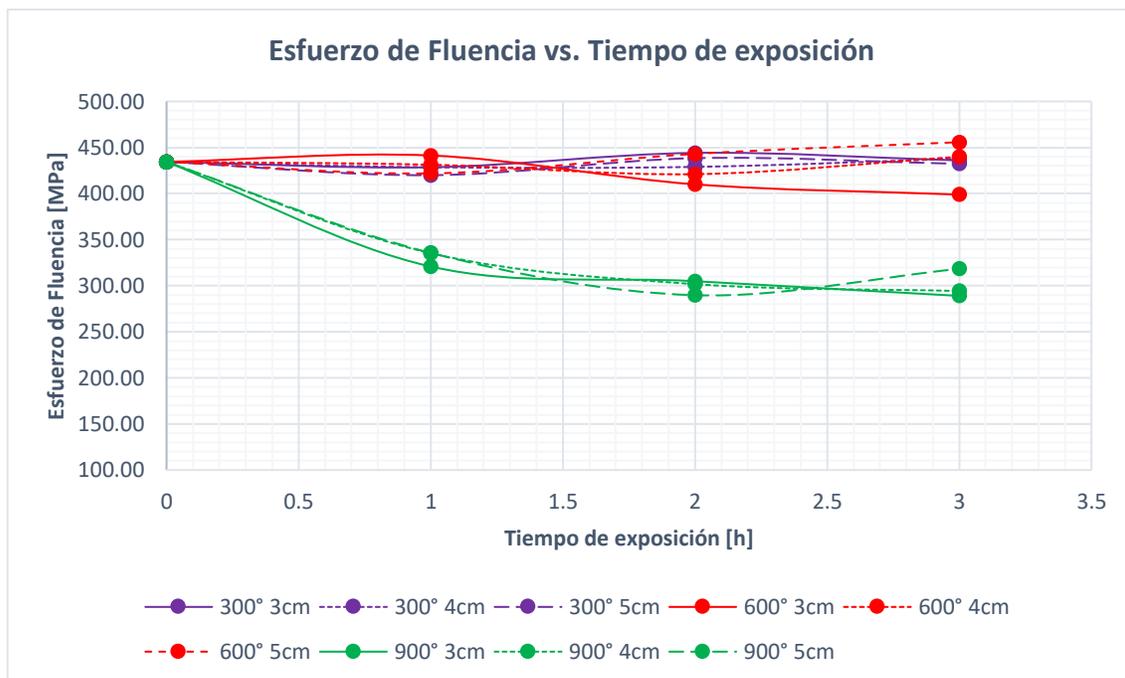


Figura 5.20 Esfuerzo de fluencia de varillas de acero [MPa] Vs. Tiempo de exposición [h].

Fuente: (Pérez&Rosero)

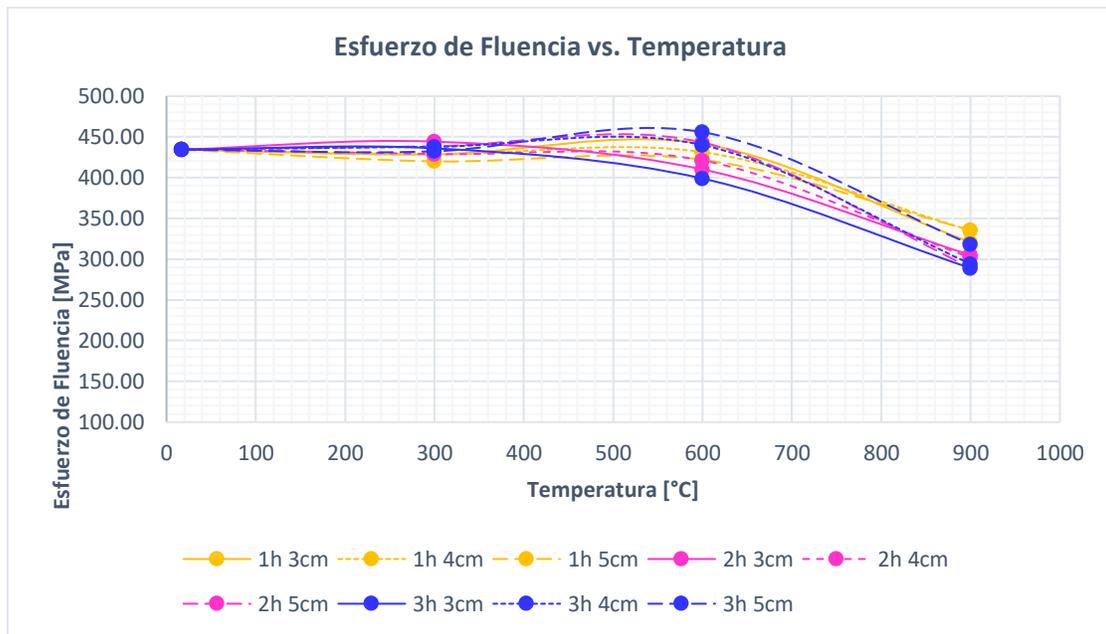


Figura 5.21 Esfuerzo de fluencia de varillas de acero [MPa] Vs. Temperatura [°C].

Fuente: (Pérez&Rosero)



Figura 5.22 Esfuerzo de fluencia de varillas de acero [MPa] Vs. Recubrimiento [cm].

Fuente: (Pérez&Rosero)

El esfuerzo de fluencia no se ve afectado por la variación del tiempo de exposición; hasta la temperatura de los 300°C no altera la fluencia comparada con el valor patrón, en 600°C ya presenta alteraciones al comportamiento del esfuerzo, pero aún no son tan significativas en la mayoría de los casos. El mayor cambio se evidencia a los 900°C, donde el descenso del esfuerzo de fluencia es pronunciado. El recubrimiento no genera un cambio notable en el comportamiento de la fluencia.

### **5.3.7. MÓDULO DE ELASTICIDAD**

La siguiente tabla 5.9 indica los resultados obtenidos del módulo de elasticidad, que fueron entregados en los informes del LEMSUR, basándose para el cálculo en la norma NTE INEN ISO 6892-1.

**Tabla 5.9***Módulo de elasticidad de varillas de acero.*

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Módulo de elasticidad	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Normal 1	17	0	0	207507	202479	5903	196576	208382	207507	205729
Normal 2				195979						
Normal 3				203951					203951	
300 1h 7cm (1)	300	1	3	155571	162507	7268	155239	169775	155571	158727
300 1h 7cm (2)				170067						
300 1h 7cm (3)				161882					161882	
300 1h 9cm (1)	300	1	4	180682	190234	9439	180795	199673		195010
300 1h 9cm (2)				199556					199556	
300 1h 9cm (3)				190463					190463	
300 1h 11 cm (1)	300	1	5	193402	193146	7731	185415	200877	193402	197074
300 1h 11cm (2)				200746					200746	
300 1h 11 cm (3)				185290						
300 2h 7cm (1)	300	2	3	160579	151390	7980	143410	159370		146796
300 2h 7cm (2)				146207					146207	
300 2h 7cm (3)				147384					147384	
300 2h 9cm (1)	300	2	4	188266	170432	22901	147531	193333	188266	183346
300 2h 9cm (2)				144606						
300 2h 9cm (3)				178425					178425	

Continuación Tabla 5.9. Módulo de elasticidad de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Módulo de elasticidad	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
300 2h 11 cm (1)	300	2	5	190422	189582	4912	184670	194493	190422	192221
300 2h 11cm (2)				184304					194019	
300 2h 11 cm (3)				194019						
300 3h 7cm (1)	300	3	3	151381	146665	4291	142374	150956		144307
300 3h 7cm (2)				142991					145622	
300 3h 7cm (3)				145622						
300 3h 9cm (1)	300	3	4	168332	172896	6474	166422	179371	168332	169192
300 3h 9cm (2)				180306					170051	
300 3h 9cm (3)				170051						
300 3h 11 cm (1)	300	3	5	191165	188141	2916	185226	191057		186630
300 3h 11cm (2)				187912					185347	
300 3h 11 cm (3)				185347						
600 1h 7cm (1)	600	1	3	134873	150146	13430	136717	163576		157783
600 1h 7cm (2)				155460					160106	
600 1h 7cm (3)				160106						
600 1h 9cm (1)	600	1	4	151409	166402	13230	153172	179632		173899
600 1h 9cm (2)				176434					171363	
600 1h 9cm (3)				171363						

Continuación Tabla 5.9. Módulo de elasticidad de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Módulo de elasticidad	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
600 1h 11 cm (1)	600	1	5	183794	189261	4741	184520	194001		191994
600 1h 11cm (2)				192240					192240	
600 1h 11 cm (3)				191748					191748	
600 2h 7cm (1)	600	2	3		145519	1008	144511	146527		145519
600 2h 7cm (2)				146232					146232	
600 2h 7cm (3)				144806					144806	
600 2h 9cm (1)	600	2	4	171839	176238	7599	168639	183836	171839	171851
600 2h 9cm (2)				185012						
600 2h 9cm (3)				171862					171862	
600 2h 11 cm (1)	600	2	5	183006	182045	5686	176359	187731	183006	185098
600 2h 11cm (2)				187189					187189	
600 2h 11 cm (3)				175940						
600 3h 7cm (1)	600	3	3	146647	139589	7722	131868	147311	146647	143713
600 3h 7cm (2)				140779					140779	
600 3h 7cm (3)				131342						
600 3h 9cm (1)	600	3	4	163152	162792	1149	161643	163941	163152	163435
600 3h 9cm (2)				161506						
600 3h 9cm (3)				163718					163718	

Continuación Tabla 5.9. Módulo de elasticidad de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Módulo de elasticidad	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
600 1h 11 cm (1)	600	1	5	183794	189261	4741	184520	194001		191994
600 1h 11cm (2)				192240					192240	
600 1h 11 cm (3)				191748					191748	
600 2h 7cm (1)	600	2	3		145519	1008	144511	146527		145519
600 2h 7cm (2)				146232					146232	
600 2h 7cm (3)				144806					144806	
600 2h 9cm (1)	600	2	4	171839	176238	7599	168639	183836	171839	171851
600 2h 9cm (2)				185012						
600 2h 9cm (3)				171862					171862	
600 2h 11 cm (1)	600	2	5	183006	182045	5686	176359	187731	183006	185098
600 2h 11cm (2)				187189					187189	
600 2h 11 cm (3)				175940						
600 3h 7cm (1)	600	3	3	146647	139589	7722	131868	147311	146647	143713
600 3h 7cm (2)				140779					140779	
600 3h 7cm (3)				131342						
600 3h 9cm (1)	600	3	4	163152	162792	1149	161643	163941	163152	163435
600 3h 9cm (2)				161506						
600 3h 9cm (3)				163718					163718	

Continuación Tabla 5.9. Módulo de elasticidad de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Módulo de elasticidad	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
600 3h 11 cm (1)	600	3	5	179393	178491	1276	177214	179767	179393	178491
600 3h 11cm (2)										
600 3h 11 cm (3)				177588					177588	
900 1h 7cm (1)	900	1	3	120413	133734	11665	122069	145399		140395
900 1h 7cm (2)				142120					142120	
900 1h 7cm (3)				138670					138670	
900 1h 9cm (1)	900	1	4	143708	143654	10438	133216	154091	143708	148886
900 1h 9cm (2)				133189						
900 1h 9cm (3)				154064					154064	
900 1h 11 cm (1)	900	1	5	180659	175491	12566	162925	188058	180659	182655
900 1h 11cm (2)				184650					184650	
900 1h 11 cm (3)				161165						
900 2h 7cm (1)	900	2	3	138315	140654	7850	132804	148504	138315	136277
900 2h 7cm (2)				149408						
900 2h 7cm (3)				134239					134239	
900 2h 9cm (1)	900	2	4	144973	143248	6162	137087	149410	144973	146669
900 2h 9cm (2)				136408						
900 2h 9cm (3)				148364					148364	

Continuación Tabla 5.9. Módulo de elasticidad de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Módulo de elasticidad	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
900 2h 11 cm (1)	900	2	5	171443	169960	2159	167801	172118	171443	171198
900 2h 11cm (2)				167483						
900 2h 11 cm (3)				170953					170953	
900 3h 7cm (1)	900	3	3	159673	139901	17726	122175	157627		130015
900 3h 7cm (2)				125432					125432	
900 3h 7cm (3)				134598					134598	
900 3h 9cm (1)	900	3	4	138846	141556	3431	138125	144987	138846	139628
900 3h 9cm (2)				140409					140409	
900 3h 9cm (3)				145414						
900 3h 11 cm (1)	900	3	5	167372	154918	11148	143770	166066		148691
900 3h 11cm (2)				151509					151509	
900 3h 11 cm (3)				145873					145873	

Fuente: (Pérez&amp;Rosero)

### 5.3.8. RESULTADO GRÁFICO DEL ESFUERZO DEL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO, TEMPERATURA Y RECUBRIMIENTO.

Los datos de la tabla 5.9 permiten obtener las siguientes gráficas, en el cual se hace una relación del módulo de elasticidad [MPa], con el tiempo (1h, 2h y 3h), la temperatura (300°C, 600°C y 900°C) y el recubrimiento (3cm, 4cm y 5cm).

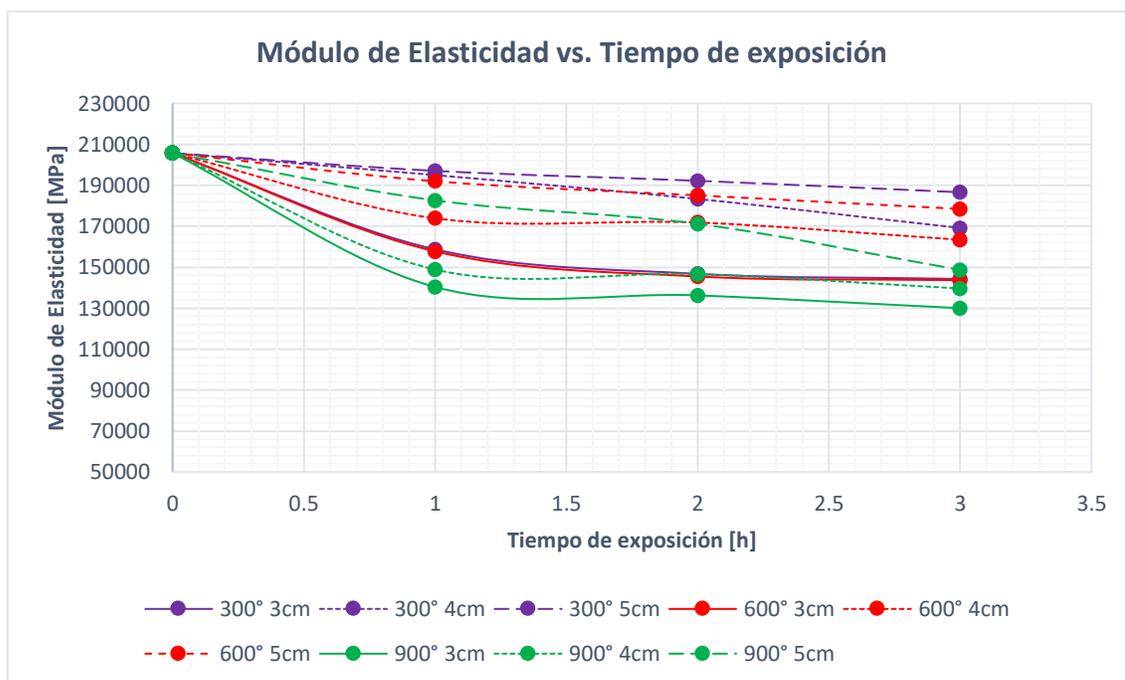


Figura 5.23 Módulo de elasticidad [MPa] Vs. Tiempo de exposición [h].

Fuente: (Pérez&Rosero)

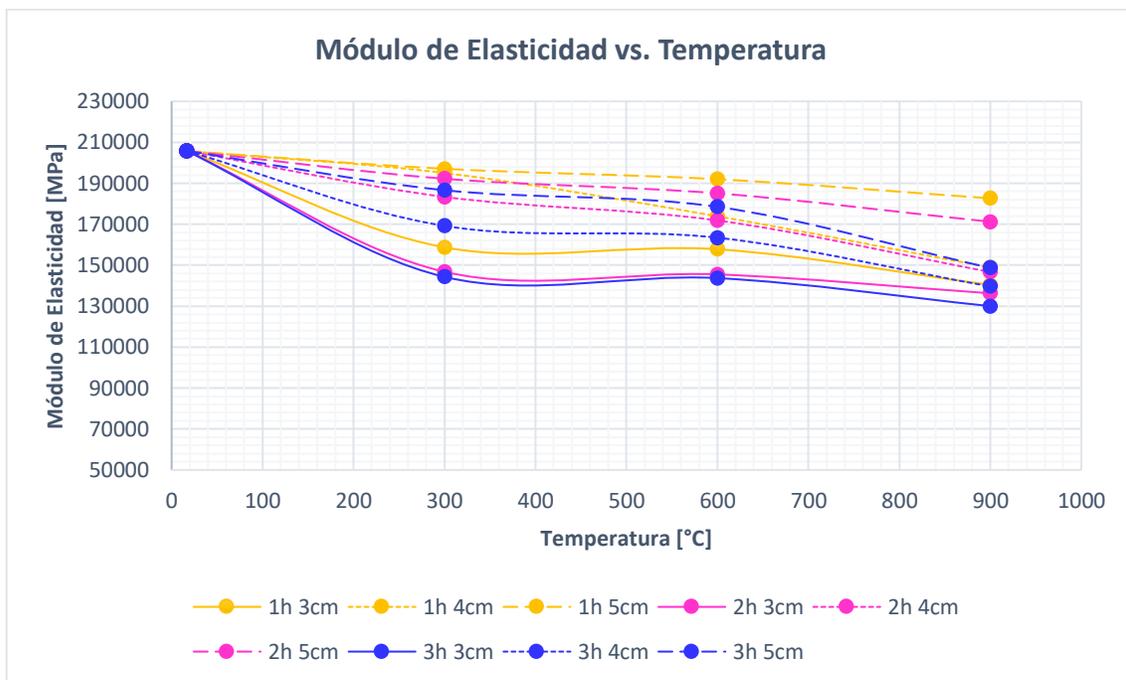


Figura 5.24 Módulo de elasticidad [MPa] Vs. Temperatura [°C].

Fuente: (Pérez&Rosero)

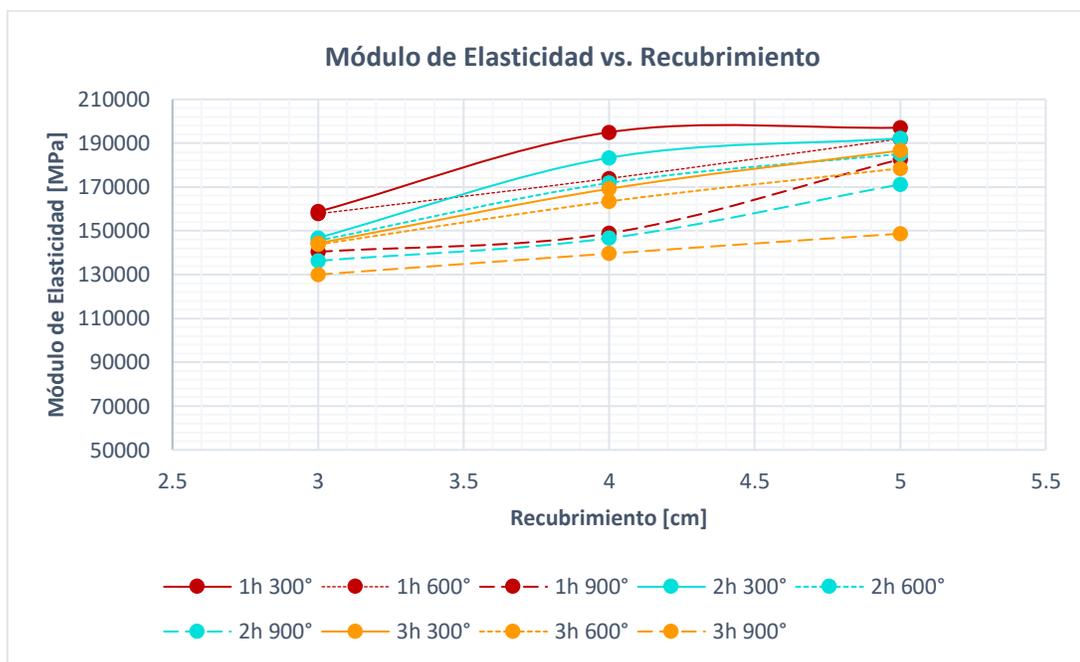


Figura 5.25 Módulo de elasticidad [MPa] Vs. Recubrimiento [cm].

Fuente: (Pérez&Rosero)

El módulo de elasticidad tiene una relación inversa con el tiempo y la temperatura en base al valor patrón como se observa en las figuras 5.23 y 5.24. En el caso del recubrimiento la relación es directa, es decir que, si influye considerablemente que se tenga mayor o menor recubrimiento, por ejemplo, para el caso que tiene un recubrimiento de 3 cm y estuvo expuesto a 900°C durante tres horas, el módulo de elasticidad bajo hasta 130015 MPa.

### **5.3.9. RESILIENCIA**

Con los datos de los informes emitidos en el LEMSUR basándose para el cálculo en la norma NTE INEN ISO 6892-1, se procede a calcular el área bajo la curva esfuerzo-deformación del rango elástico para conocer los valores de resiliencia y generar la tabla 5.10:

**Tabla 5.10***Resiliencia de varillas de acero.*

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Resiliencia	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Normal 1	17	0	0	44.06	37.84	11.08	26.76	48.93	44.06	44.24
Normal 2				44.42					44.42	
Normal 3				25.04						
300 1h 7cm (1)	300	1	3	43.33	44.29	3.59	40.70	47.88	43.33	42.31
300 1h 7cm (2)				41.28					41.28	
300 1h 7cm (3)				48.26						
300 1h 9cm (1)	300	1	4	54.36	51.93	2.97	48.97	54.90	54.36	53.59
300 1h 9cm (2)				48.63					52.82	
300 1h 9cm (3)				52.82						
300 1h 11 cm (1)	300	1	5	51.79	58.30	8.30	50.00	66.61	51.79	53.63
300 1h 11cm (2)				67.65					55.46	
300 1h 11 cm (3)				55.46						
300 2h 7cm (1)	300	2	3	42.92	42.92	2.44	40.48	45.37	42.92	41.70
300 2h 7cm (2)				40.48					40.48	
300 2h 7cm (3)				45.37						
300 2h 9cm (1)	300	2	4	43.54	50.22	11.74	38.48	61.96	43.54	43.44
300 2h 9cm (2)				63.77					43.35	
300 2h 9cm (3)				43.35						

Fuente: (Pérez&amp;Rosero)

Continuación Tabla 5.10. Resiliencia de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Resiliencia	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
300 2h 11 cm (1)	300	2	5	53.23	58.08	4.51	53.57	62.59		60.51
300 2h 11cm (2)				62.15					62.15	
300 2h 11 cm (3)				58.87					58.87	
300 3h 7cm (1)	300	3	3	44.24	42.82	2.11	40.71	44.93	44.24	44.03
300 3h 7cm (2)				40.40						
300 3h 7cm (3)				43.82					43.82	
300 3h 9cm (1)	300	3	4	43.45	44.08	3.22	40.86	47.30	43.45	42.33
300 3h 9cm (2)				47.57						
300 3h 9cm (3)				41.22					41.22	
300 3h 11 cm (1)	300	3	5	52.88	50.64	2.76	47.88	53.39	52.88	52.18
300 3h 11cm (2)				47.55						
300 3h 11 cm (3)				51.48					51.48	
600 1h 7cm (1)	600	1	3	48.85	49.54	4.59	44.95	54.12	48.85	47.09
600 1h 7cm (2)				54.43						
600 1h 7cm (3)				45.33					45.33	
600 1h 9cm (1)	600	1	4	46.89	49.84	4.17	45.67	54.00	46.89	49.84
600 1h 9cm (2)										
600 1h 9cm (3)				52.78					52.78	

Continuación Tabla 5.10. Resiliencia de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Resiliencia	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
600 1h 11 cm (1)	600	1	5	48.48	53.84	8.37	45.47	62.21	48.48	49.02
600 1h 11cm (2)				49.56					49.56	
600 1h 11 cm (3)				63.48						
600 2h 7cm (1)	600	2	3	46.70	44.39	2.49	41.90	46.87	46.70	45.70
600 2h 7cm (2)				41.76						
600 2h 7cm (3)				44.71					44.71	
600 2h 9cm (1)	600	2	4	50.15	49.04	2.81	46.23	51.85	50.15	50.64
600 2h 9cm (2)				45.84						
600 2h 9cm (3)				51.12					51.12	
600 2h 11 cm (1)	600	2	5	62.88	53.57	8.87	44.70	62.44		48.91
600 2h 11cm (2)				45.22					45.22	
600 2h 11 cm (3)				52.59					52.59	
600 3h 7cm (1)	600	3	3	47.19	43.54	3.27	40.27	46.81		41.71
600 3h 7cm (2)				42.52					42.52	
600 3h 7cm (3)				40.90					40.90	
600 3h 9cm (1)	600	3	4	50.09	48.06	2.70	45.35	50.76	50.09	49.59
600 3h 9cm (2)				49.08					49.08	
600 3h 9cm (3)				44.99						

Continuación Tabla 5.10. Resiliencia de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Resiliencia	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
600 3h 11 cm (1)	600	3	5		50.29	7.81	42.48	58.09		50.29
600 3h 11cm (2)				55.81					55.81	
600 3h 11 cm (3)				44.77					44.77	
900 1h 7cm (1)	900	1	3	40.03	31.39	8.01	23.37	39.40		27.06
900 1h 7cm (2)				24.20					24.20	
900 1h 7cm (3)				29.93					29.93	
900 1h 9cm (1)	900	1	4	31.18	31.65	2.77	28.88	34.43	31.18	30.16
900 1h 9cm (2)				29.15					29.15	
900 1h 9cm (3)				34.64						
900 1h 11 cm (1)	900	1	5	36.72	33.27	4.26	29.01	37.53	36.72	35.65
900 1h 11cm (2)				34.58					34.58	
900 1h 11 cm (3)				28.50						
900 2h 7cm (1)	900	2	3	26.28	26.62	0.57	26.05	27.18	26.28	26.29
900 2h 7cm (2)				26.30					26.30	
900 2h 7cm (3)				27.27						
900 2h 9cm (1)	900	2	4	28.48	28.13	0.45	27.68	28.58	28.48	28.39
900 2h 9cm (2)				27.62						
900 2h 9cm (3)				28.30					28.30	

Continuación Tabla 5.10. Resiliencia de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Resiliencia	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
900 2h 11 cm (1)	900	2	5	30.99	29.28	3.24	26.03	32.52	30.99	31.15
900 2h 11cm (2)				25.54						
900 2h 11 cm (3)				31.31					31.31	
900 3h 7cm (1)	900	3	3	20.10	23.41	4.03	19.39	27.44	20.10	21.17
900 3h 7cm (2)				27.89						
900 3h 7cm (3)				22.25					22.25	
900 3h 9cm (1)	900	3	4	25.96	27.14	1.03	26.11	28.18		27.74
900 3h 9cm (2)				27.89					27.89	
900 3h 9cm (3)				27.59					27.59	
900 3h 11 cm (1)	900	3	5	24.67	28.38	3.21	25.17	31.59		30.24
900 3h 11cm (2)				30.31					30.31	
900 3h 11 cm (3)				30.16					30.16	

Fuente: (Pérez&amp;Rosero)

### 5.3.10. RESULTADO GRÁFICO DEL ESFUERZO DE LA RESILIENCIA EN FUNCIÓN DEL TIEMPO, TEMPERATURA Y RECUBRIMIENTO.

En las siguientes figuras se representa los valores promedios calculados en la tabla 5.10, que hace una relación de la resiliencia [MPa] con el tiempo de exposición (1h, 2h y 3h), la temperatura (300°C, 600°C y 900°C) y el recubrimiento (3cm, 4cm y 5cm).

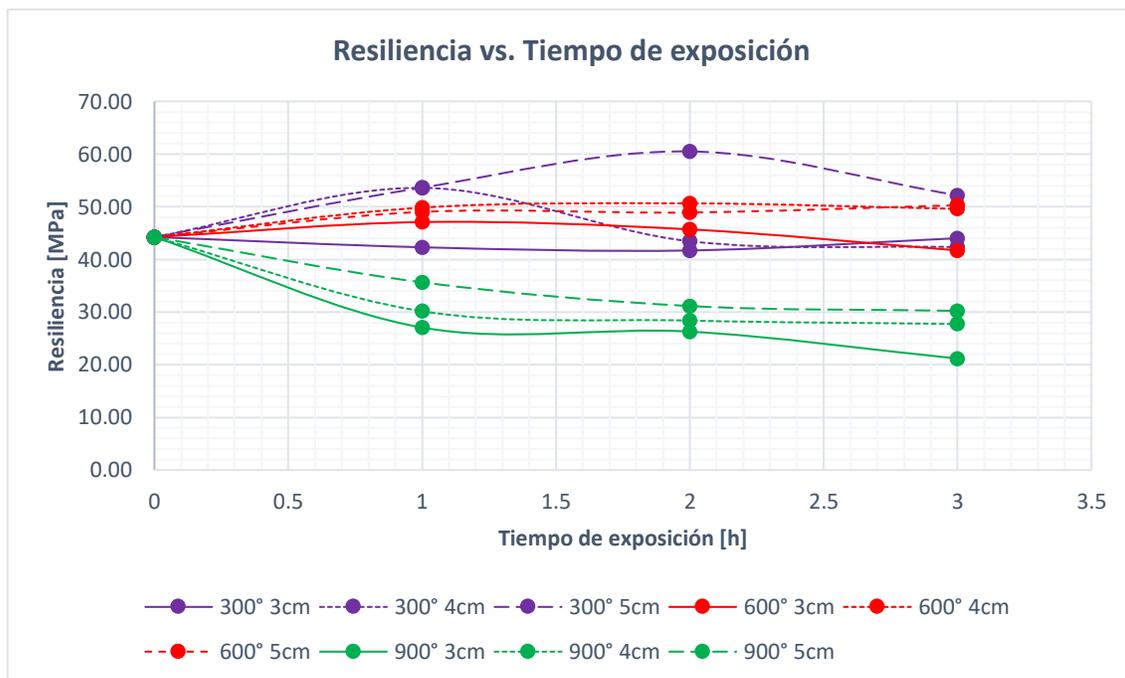


Figura 5.26 Resiliencia [MPa] Vs. Tiempo de exposición [h].

Fuente: (Pérez&Rosero)

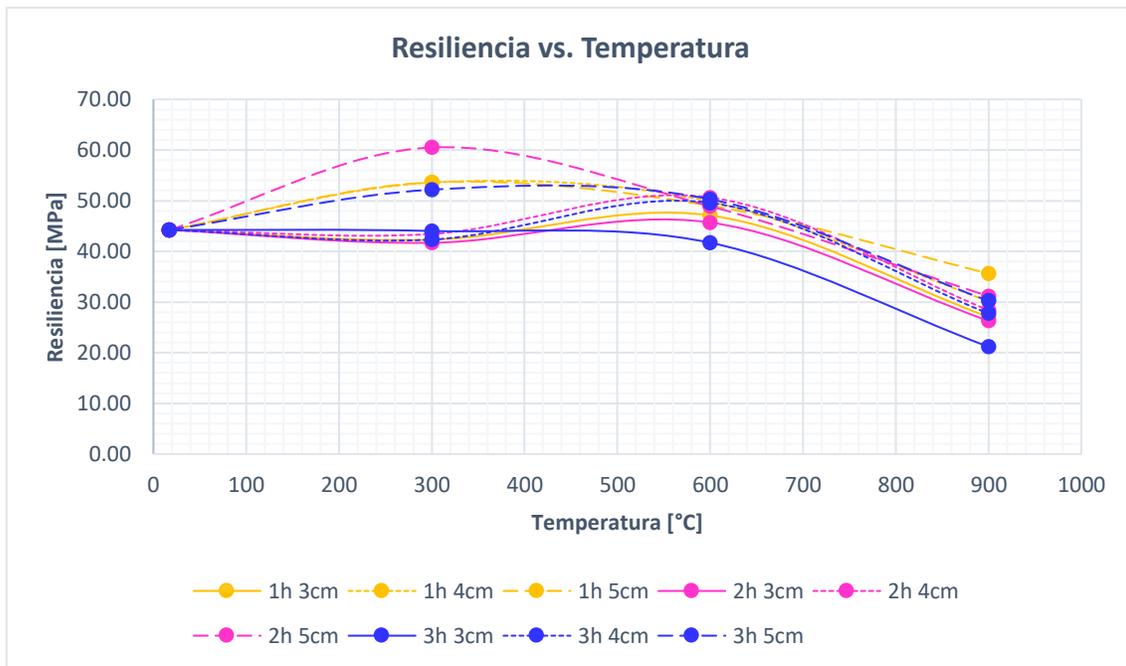


Figura 5.27 Resiliencia [MPa] Vs. Temperatura [°C].

Fuente: (Pérez&Rosero)



Figura 5.28 Resiliencia [MPa] Vs. Recubrimiento [cm].

Fuente: (Pérez&Rosero)

Para la comparación de estos resultados se ha tomado como base referencial un valor de resiliencia inicial de 44.24 MPa. En la figura 5.26 se evidencia que el tiempo de exposición tiene influencia en las varillas que son expuestas a 900°C, haciendo que los valores sean menores a comparación inicial. En la figura 5.27 se nota un aumento de la resiliencia para las varillas que fueron sometidas a 300°C con el mayor recubrimiento; en los 600°C vuelven a estabilizarse alrededor de su valor patrón y en los 900°C todos los valores disminuyen de manera considerable.

Por otro lado, el aumento del recubrimiento permite que la afectación sea menor.

### **5.3.11. TENACIDAD**

Con los datos obtenidos de los ensayos a tracción de las varillas de acero, se generó la curva esfuerzo-deformación, de la cual se procede a calcular el área bajo la curva de toda la zona para conocer los valores de la tenacidad y registrarlos en la tabla 5.11.

**Tabla 5.11***Tenacidad de varillas de acero.*

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Tenacidad	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
Normal 1	17	0	0	7697.8	7980.6	280.5	7700.1	8261.1		8122.0
Normal 2				7985.3					7985.3	
Normal 3				8258.7					8258.7	
300 1h 7cm (1)	300	1	3	8019.0	8123.1	117.9	8005.1	8241.0	8019.0	8059.0
300 1h 7cm (2)				8251.2						
300 1h 7cm (3)				8098.9					8098.9	
300 1h 9cm (1)	300	1	4	7851.4	7760.0	273.9	7486.1	8034.0	7851.4	7914.0
300 1h 9cm (2)				7976.6					7976.6	
300 1h 9cm (3)				7452.1						
300 1h 11 cm (1)	300	1	5	8079.0	7752.9	282.7	7470.1	8035.6		7589.8
300 1h 11cm (2)				7576.5					7576.5	
300 1h 11 cm (3)				7603.1					7603.1	
300 2h 7cm (1)	300	2	3	7809.3	7853.6	224.7	7628.9	8078.3	7809.3	7731.8
300 2h 7cm (2)				7654.3					7654.3	
300 2h 7cm (3)				8097.1						
300 2h 9cm (1)	300	2	4	8273.0	8093.6	585.5	7508.1	8679.1	8273.0	8420.7
300 2h 9cm (2)				7439.4						
300 2h 9cm (3)				8568.4					8568.4	

Continuación Tabla 5.11. Tenacidad de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Tenacidad	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
300 2h 11 cm (1)	300	2	5	7775.1	8049.8	485.7	7564.0	8535.5	7775.1	7769.3
300 2h 11cm (2)				8610.6						
300 2h 11 cm (3)				7763.6					7763.6	
300 3h 7cm (1)	300	3	3	7764.6	7652.4	105.8	7546.6	7758.2		7596.3
300 3h 7cm (2)				7638.0					7638.0	
300 3h 7cm (3)				7554.5					7554.5	
300 3h 9cm (1)	300	3	4	7869.8	7920.3	201.4	7718.9	8121.7	7869.8	7809.4
300 3h 9cm (2)				7749.0					7749.0	
300 3h 9cm (3)				8142.2						
300 3h 11 cm (1)	300	3	5	7856.9	8228.4	366.8	7861.6	8595.2		8414.1
300 3h 11cm (2)				8237.9					8237.9	
300 3h 11 cm (3)				8590.4					8590.4	
600 1h 7cm (1)	600	1	3	6766.2	6878.9	284.8	6594.1	7163.7	6766.2	6716.9
600 1h 7cm (2)				6667.7					6667.7	
600 1h 7cm (3)				7202.9						
600 1h 9cm (1)	600	1	4	8325.0	8288.8	43.9	8244.8	8332.7	8325.0	8313.2
600 1h 9cm (2)				8301.5					8301.5	
600 1h 9cm (3)				8239.9						

Continuación Tabla 5.11. Tenacidad de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Tenacidad	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
600 1h 11 cm (1)	600	1	5	8177.4	7971.0	218.5	7752.5	8189.6	8177.4	8085.5
600 1h 11cm (2)				7742.0						
600 1h 11 cm (3)				7993.7					7993.7	
600 2h 7cm (1)	600	2	3	6793.3	6870.5	673.7	6196.8	7544.2	6793.3	6516.0
600 2h 7cm (2)				6238.8					6238.8	
600 2h 7cm (3)				7579.4						
600 2h 9cm (1)	600	2	4	6910.9	7305.5	342.6	6962.9	7648.1		7502.8
600 2h 9cm (2)				7478.9					7478.9	
600 2h 9cm (3)				7526.7					7526.7	
600 2h 11 cm (1)	600	2	5	8319.2	5187.0	4524.2	662.7	9711.2	8319.2	7780.5
600 2h 11cm (2)				7241.8					7241.8	
600 2h 11 cm (3)				0.0						
600 3h 7cm (1)	600	3	3	7309.6	6898.0	369.7	6528.3	7267.7		6692.2
600 3h 7cm (2)				6790.2					6790.2	
600 3h 7cm (3)				6594.2					6594.2	
600 3h 9cm (1)	600	3	4	7163.8	7646.4	526.5	7119.9	8172.9	7163.8	7365.7
600 3h 9cm (2)				7567.5					7567.5	
600 3h 9cm (3)				8207.8						

Continuación Tabla 5.11. Tenacidad de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Tenacidad	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
600 3h 11 cm (1)	600	3	5	8463.5	5505.4	4772.2	733.2	10277.6	8463.5	8258.0
600 3h 11cm (2)				0.0						
600 3h 11 cm (3)				8052.6					8052.6	
900 1h 7cm (1)	900	1	3	7213.9	7554.4	355.8	7198.6	7910.2	7213.9	7369.8
900 1h 7cm (2)				7525.6					7525.6	
900 1h 7cm (3)				7923.8						
900 1h 9cm (1)	900	1	4	7543.4	7549.1	150.9	7398.2	7699.9	7543.4	7472.3
900 1h 9cm (2)				7401.1					7401.1	
900 1h 9cm (3)				7702.7						
900 1h 11 cm (1)	900	1	5	7861.2	7687.3	228.9	7458.3	7916.2	7861.2	7817.0
900 1h 11cm (2)				7772.8					7772.8	
900 1h 11 cm (3)				7427.9						
900 2h 7cm (1)	900	2	3	7680.7	7923.7	281.0	7642.7	8204.7	7680.7	7769.9
900 2h 7cm (2)				7859.1					7859.1	
900 2h 7cm (3)				8231.4						
900 2h 9cm (1)	900	2	4	7332.0	7686.2	322.6	7363.7	8008.8		7863.3
900 2h 9cm (2)				7763.7					7763.7	
900 2h 9cm (3)				7963.0					7963.0	

Continuación Tabla 5.11. Tenacidad de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Tenacidad	Promedio inicial	Desviación	Mínimo	Máximo	Valores dentro del rango	Promedio final
	[°C]	[h]	[cm]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]	[MPa]
900 2h 11 cm (1)	900	2	5	7961.2	7850.7	133.7	7716.9	7984.4	7961.2	7925.0
900 2h 11cm (2)				7888.8					7888.8	
900 2h 11 cm (3)				7702.0						
900 3h 7cm (1)	900	3	3	7439.9	7407.1	74.8	7332.3	7481.8	7439.9	7449.9
900 3h 7cm (2)				7459.8					7459.8	
900 3h 7cm (3)				7321.5						
900 3h 9cm (1)	900	3	4	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	0.0	7657.0
900 3h 9cm (2)				0.0					0.0	
900 3h 9cm (3)				0.0					0.0	
900 3h 11 cm (1)	900	3	5	8230.0	7986.1	234.3	7751.8	8220.5		7864.2
900 3h 11cm (2)				7965.7					7965.7	
900 3h 11 cm (3)				7762.7					7762.7	

Fuente: (Pérez&amp;Rosero)

### 5.3.12. RESULTADO GRÁFICO DEL ESFUERZO DE LA TENACIDAD EN FUNCIÓN DEL TIEMPO, TEMPERATURA Y RECUBRIMIENTO.

Con los datos de la tabla 5.11 en donde se encuentra los valores promedio de la tenacidad para cada uno de los casos, se realiza las siguientes gráficas para un mejor análisis y visualización de los efectos.

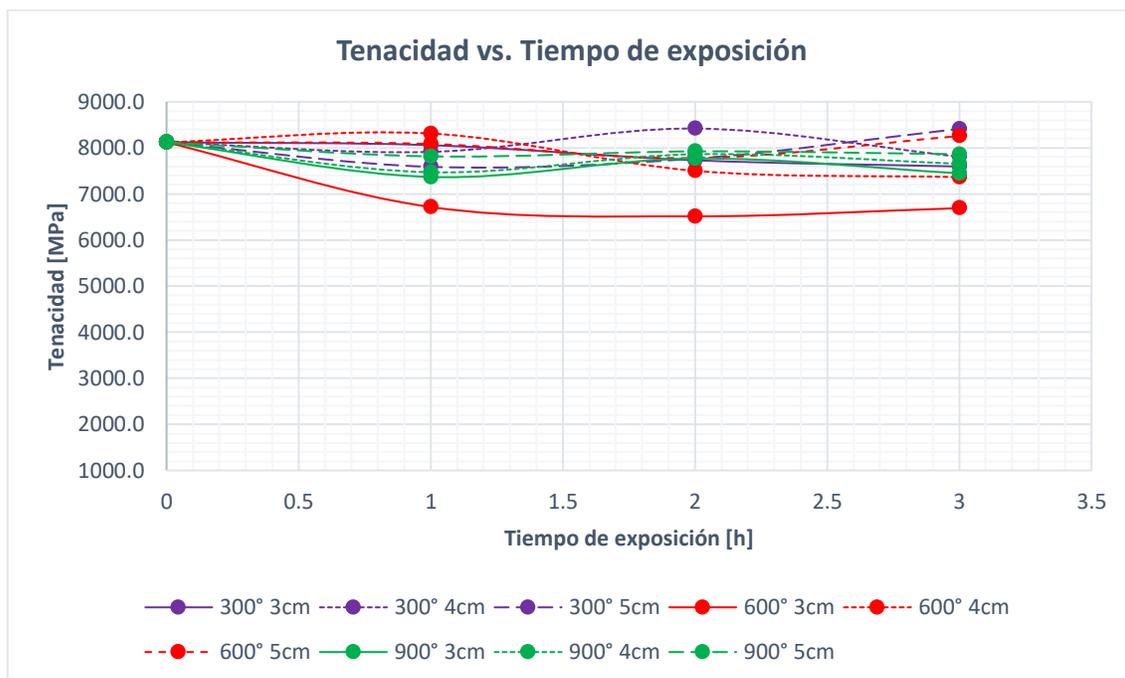


Figura 5.29 Tenacidad [MPa] Vs. Tiempo de exposición [h].

Fuente: (Pérez&Rosero)

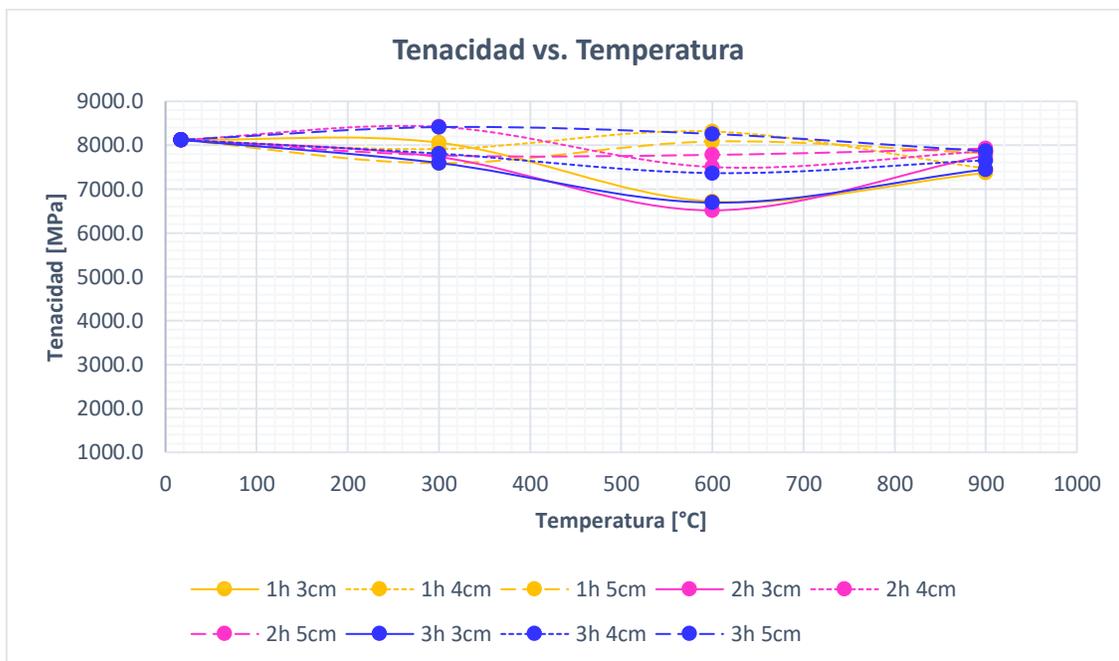


Figura 5.30 Tenacidad [MPa] Vs. Temperatura [°C].

Fuente: (Pérez&Rosero)

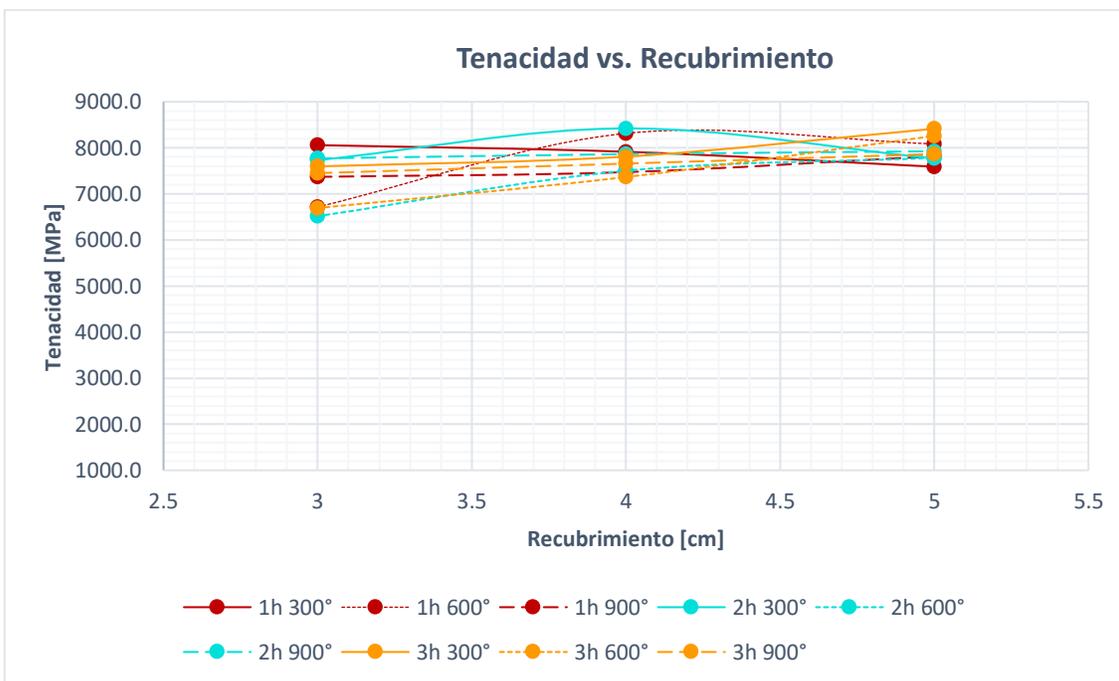


Figura 5.31 Tenacidad [MPa] Vs. Recubrimiento [cm].

Fuente: (Pérez&Rosero)

Estas gráficas indican que no existe una relación clara que ayude a determinar el comportamiento o variación de la tenacidad en función del tiempo de exposición, la temperatura y el recubrimiento.

### **5.3.13. RESULTADOS DE LA AFECTACIÓN DE LAS PROPIEDADES DEL ACERO**

En la tabla 5.12 se indica el porcentaje de afectación de cada una de las propiedades, que se han calculado en base a la varilla patrón, que posee una longitud de 50 cm.

$$Afectación [\%] = \frac{Valor\ promedio\ final - Valor\ promedio\ final\ patrón}{Valor\ promedio\ final\ patrón} * 100 \quad (14)$$

Con los porcentajes de afectación de la tabla 5.12 se elaboró una gráfica para cada propiedad con el fin de comparar la variación de afectación en función del recubrimiento.

**Tabla 5.12**

*Porcentaje de afectación a las propiedades de varillas de acero.*

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Afectación resistencia	Afectación ductilidad	Afectación fluencia	Afectación elasticidad	Afectación resiliencia	Afectación tenacidad
	[°C]	[h]	[cm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
Normal 1	27	0	0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
Normal 2									
Normal 3									
300 1h 7cm (1)	300	1	3	0.69	-0.77	-1.34	-22.85	-4.37	-0.78
300 1h 7cm (2)									
300 1h 7cm (3)									
300 1h 9cm (1)	300	1	4	-0.44	-2.43	-1.33	-5.21	21.13	-2.56
300 1h 9cm (2)									
300 1h 9cm (3)									
300 1h 11 cm (1)	300	1	5	0.65	-5.59	-3.32	-4.21	21.22	-6.55
300 1h 11cm (2)									
300 1h 11 cm (3)									
300 2h 7cm (1)	300	2	3	-0.37	-3.86	2.25	-28.65	-5.74	-4.80
300 2h 7cm (2)									
300 2h 7cm (3)									
300 2h 9cm (1)	300	2	4	0.11	3.40	-1.25	-10.88	-1.80	3.68
300 2h 9cm (2)									
300 2h 9cm (3)									

Continuación Tabla 5.12. Porcentaje de afectación a las propiedades de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Afectación resistencia	Afectación ductilidad	Afectación fluencia	Afectación elasticidad	Afectación resiliencia	Afectación tenacidad
	[°C]	[h]	[cm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
300 2h 11 cm (1)	300	2	5	0.98	-5.42	0.93	-6.57	36.77	-4.34
300 2h 11cm (2)									
300 2h 11 cm (3)									
300 3h 7cm (1)	300	3	3	0.41	-5.25	0.36	-29.86	-0.48	-6.47
300 3h 7cm (2)									
300 3h 7cm (3)									
300 3h 9cm (1)	300	3	4	0.39	-2.67	0.79	-17.76	-4.31	-3.85
300 3h 9cm (2)									
300 3h 9cm (3)									
300 3h 11 cm (1)	300	3	5	0.19	3.66	-0.49	-9.28	17.94	3.60
300 3h 11cm (2)									
300 3h 11 cm (3)									
600 1h 7cm (1)	600	1	3	-11.99	-2.93	1.60	-23.31	6.45	-17.30
600 1h 7cm (2)									
600 1h 7cm (3)									
600 1h 9cm (1)	600	1	4	-0.70	4.52	-0.71	-15.47	12.65	2.35
600 1h 9cm (2)									
600 1h 9cm (3)									
600 1h 11 cm (1)	600	1	5	-0.55	-3.43	-2.87	-6.68	10.80	-0.45
600 1h 11cm (2)									
600 1h 11 cm (3)									

Continuación Tabla 5.12. Porcentaje de afectación a las propiedades de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Afectación resistencia	Afectación ductilidad	Afectación fluencia	Afectación elasticidad	Afectación resiliencia	Afectación tenacidad
	[°C]	[h]	[cm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
600 2h 7cm (1)	600	2	3	-12.94	-7.11	-5.61	-29.27	3.31	-19.77
600 2h 7cm (2)									
600 2h 7cm (3)									
600 2h 9cm (1)	600	2	4	-3.68	-3.23	-3.06	-16.47	14.46	-7.62
600 2h 9cm (2)									
600 2h 9cm (3)									
600 2h 11 cm (1)	600	2	5	-0.44	-6.22	2.00	-10.03	10.55	-4.21
600 2h 11cm (2)									
600 2h 11 cm (3)									
600 3h 7cm (1)	600	3	3	-10.47	-5.81	-8.17	-30.14	-5.72	-17.60
600 3h 7cm (2)									
600 3h 7cm (3)									
600 3h 9cm (1)	600	3	4	-3.29	3.15	1.28	-20.56	12.09	-9.31
600 3h 9cm (2)									
600 3h 9cm (3)									
600 3h 11 cm (1)	600	3	5	-0.88	3.97	4.93	-13.24	13.67	1.67
600 3h 11cm (2)									
600 3h 11 cm (3)									
900 1h 7cm (1)	900	1	3	-21.03	24.00	-26.14	-31.76	-38.82	-9.26
900 1h 7cm (2)									
900 1h 7cm (3)									

Continuación Tabla 5.12. Porcentaje de afectación a las propiedades de varillas de acero.

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Afectación resistencia	Afectación ductilidad	Afectación fluencia	Afectación elasticidad	Afectación resiliencia	Afectación tenacidad
	[°C]	[h]	[cm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
900 1h 9cm (1)	900	1	4	-18.08	14.43	-22.82	-27.63	-31.82	-8.00
900 1h 9cm (2)									
900 1h 9cm (3)									
900 1h 11 cm (1)	900	1	5	-18.28	18.75	-22.75	-11.22	-19.42	-3.76
900 1h 11cm (2)									
900 1h 11 cm (3)									
900 2h 7cm (1)	900	2	3	-21.35	20.47	-29.81	-33.76	-40.58	-4.34
900 2h 7cm (2)									
900 2h 7cm (3)									
900 2h 9cm (1)	900	2	4	-20.78	25.87	-30.54	-28.71	-35.83	-3.18
900 2h 9cm (2)									
900 2h 9cm (3)									
900 2h 11 cm (1)	900	2	5	-18.74	20.66	-33.30	-16.78	-29.59	-2.43
900 2h 11cm (2)									
900 2h 11 cm (3)									
900 3h 7cm (1)	900	3	3	-23.59	24.70	-33.47	-36.80	-52.14	-8.28
900 3h 7cm (2)									
900 3h 7cm (3)									
900 3h 9cm (1)	900	3	4	-21.41	15.83	-32.26	-32.13	-37.31	-5.73
900 3h 9cm (2)									
900 3h 9cm (3)									

*Continuación Tabla 5.12. Porcentaje de afectación a las propiedades de varillas de acero.*

Descripción	Temperatura	Tiempo	Recubrimiento	Afectación resistencia	Afectación ductilidad	Afectación fluencia	Afectación elasticidad	Afectación resiliencia	Afectación tenacidad
	[°C]	[h]	[cm]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]	[%]
900 3h 11 cm (1)	900	3	5	-18.88	21.12	-26.73	-27.72	-31.66	-3.17
900 3h 11cm (2)									
900 3h 11 cm (3)									

Fuente: (Pérez&Rosero)

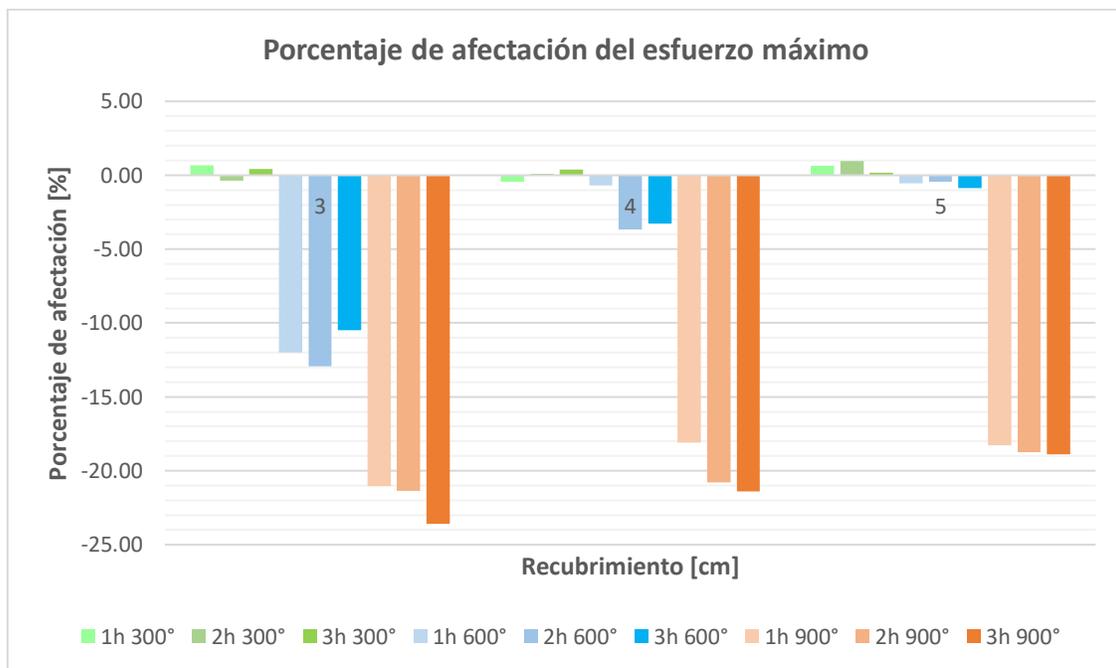


Figura 5.32 Porcentaje de afectación del esfuerzo máximo.

Fuente: (Pérez&Rosero)

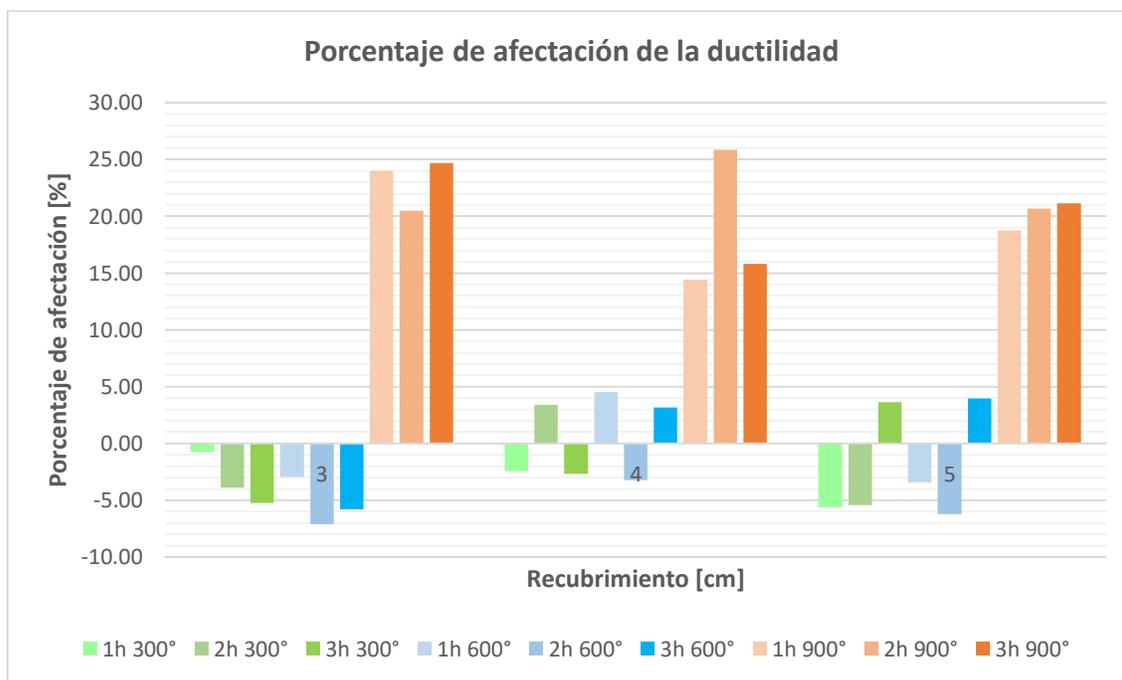


Figura 5.33 Porcentaje de afectación de la ductilidad.

Fuente: (Pérez&Rosero)

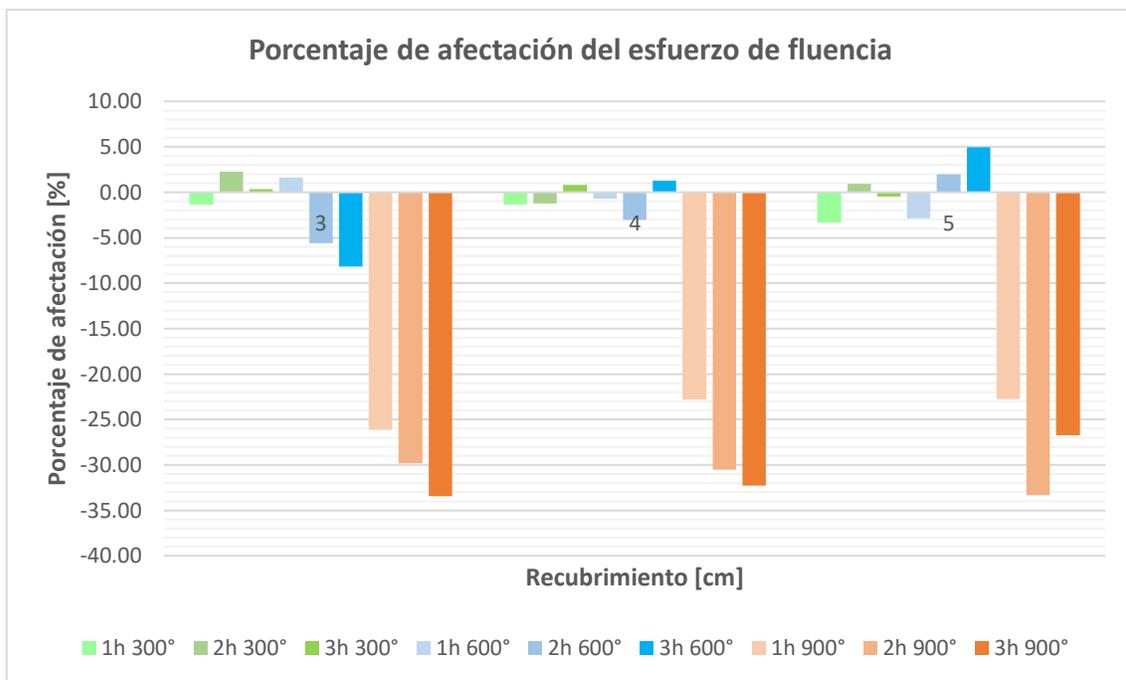


Figura 5.34 Porcentaje de afectación del esfuerzo de fluencia.

Fuente: (Pérez&Rosero)

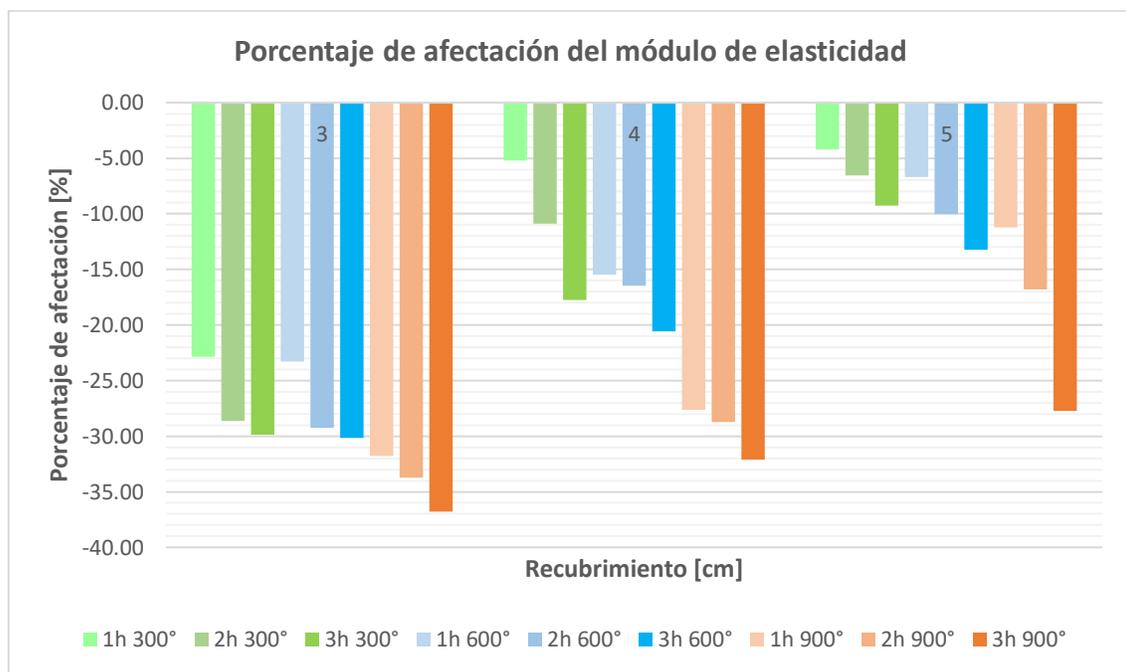


Figura 5.35 Porcentaje de afectación del módulo de elasticidad.

Fuente: (Pérez&Rosero)

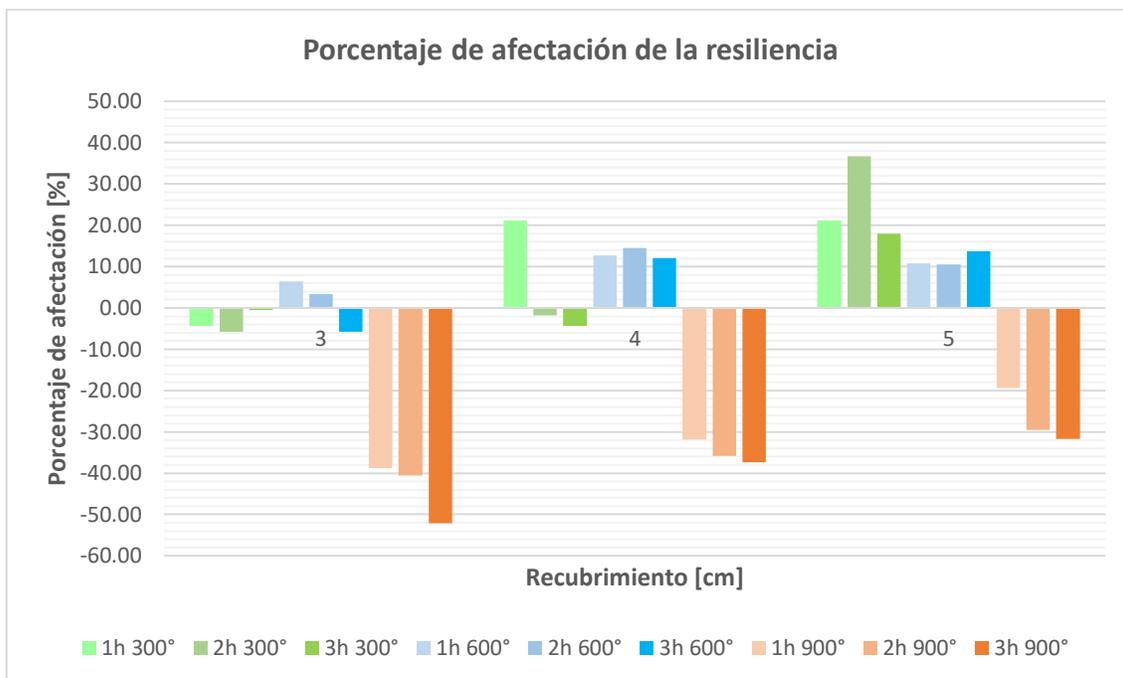


Figura 5.36 Porcentaje de afectación de la resiliencia.

Fuente: (Pérez&Rosero)

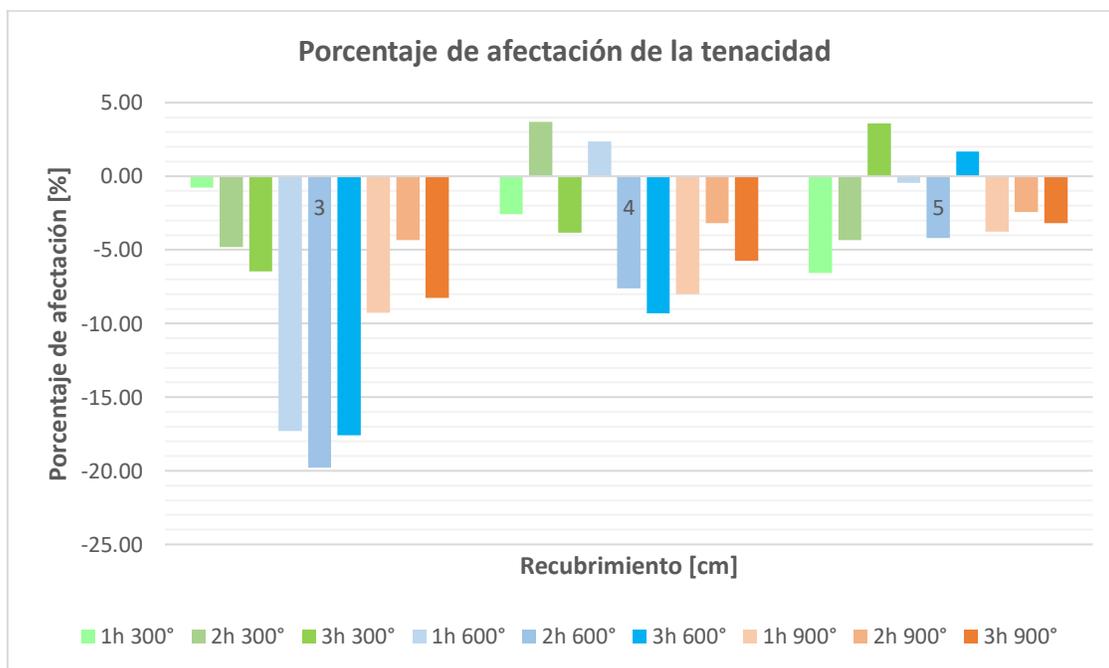


Figura 5.37 Porcentaje de afectación de la tenacidad.

Fuente: (Pérez&Rosero)

#### **5.4. RELACIÓN MATEMÁTICA ENTRE EL RECUBRIMIENTO Y LAS PROPIEDADES MECÁNICAS DEL ACERO.**

La relación entre las propiedades del acero con el recubrimiento se basa en la aplicación de una gráfica para cada tiempo de exposición, teniendo como ejes la temperatura y la propiedad a analizar.

Para una aplicación práctica, en la evaluación del comportamiento estructural del acero de refuerzo afectado por un incendio, es necesario seguir los siguientes pasos:

1. Conocer dos datos iniciales del tiempo de duración y la temperatura aproximada alcanzada en el incendio.
2. Seleccionar la gráfica correspondiente al tiempo y a la propiedad.
3. Reemplazar la temperatura en la ecuación, tomando en cuenta el recubrimiento que se tenga.
4. Calcular el valor de la propiedad a analizar.

Siguiendo este proceso se puede conocer el estado del acero después de haber sido sometido a altas temperaturas, analizando cada una de las propiedades.

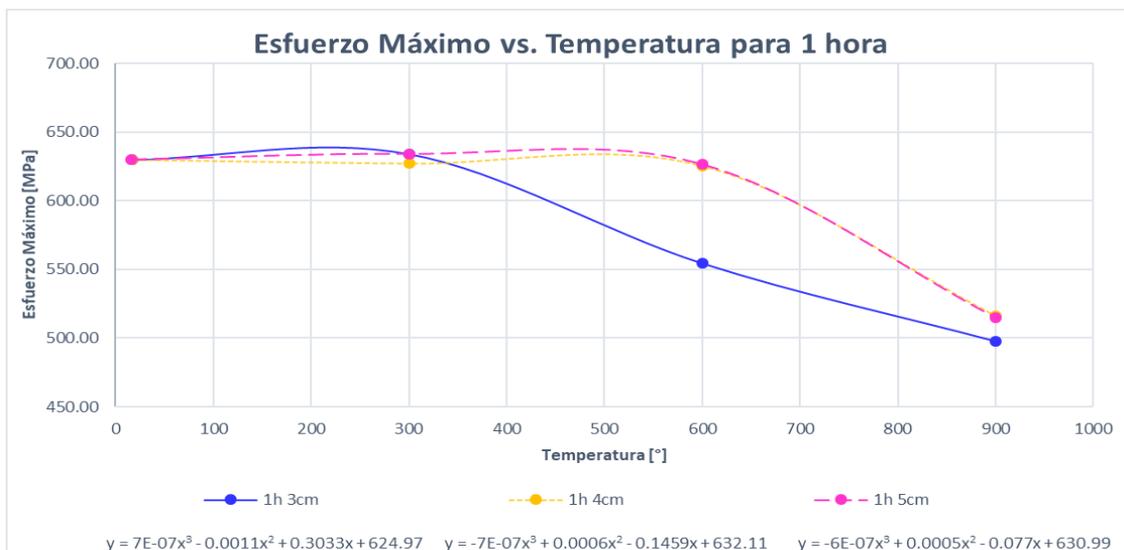


Figura 5.38 Relación esfuerzo máximo para 1h.

Fuente: (Pérez&Rosero)

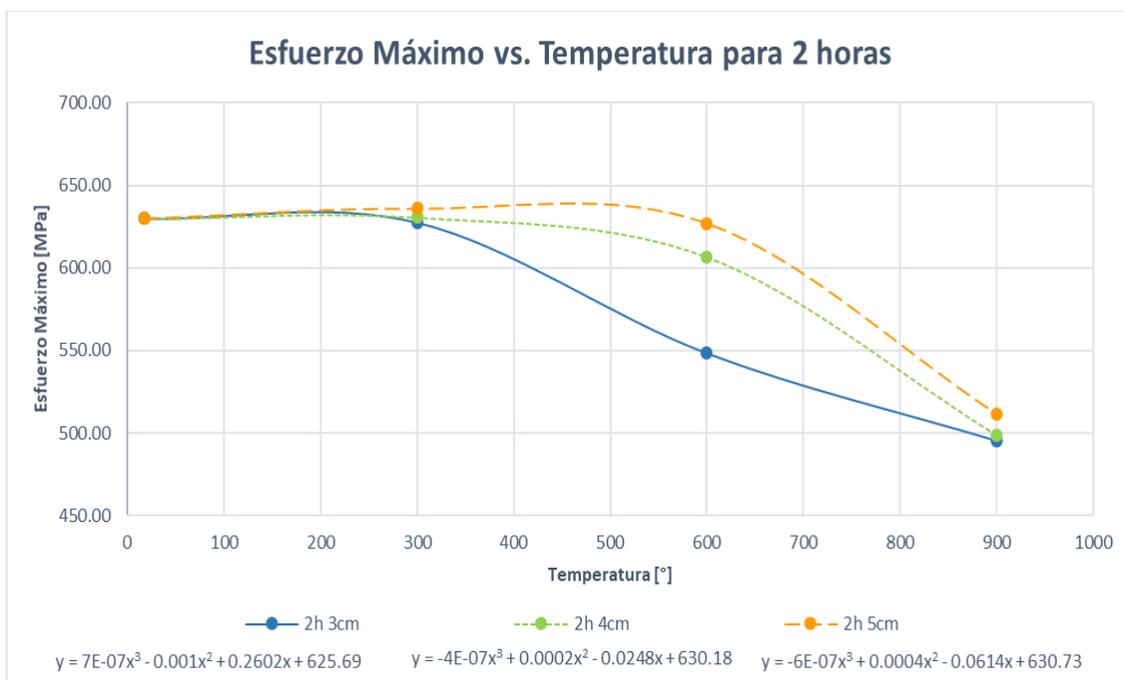


Figura 5.39 Relación esfuerzo máximo para 2h.

Fuente:(Pérez&Rosero)

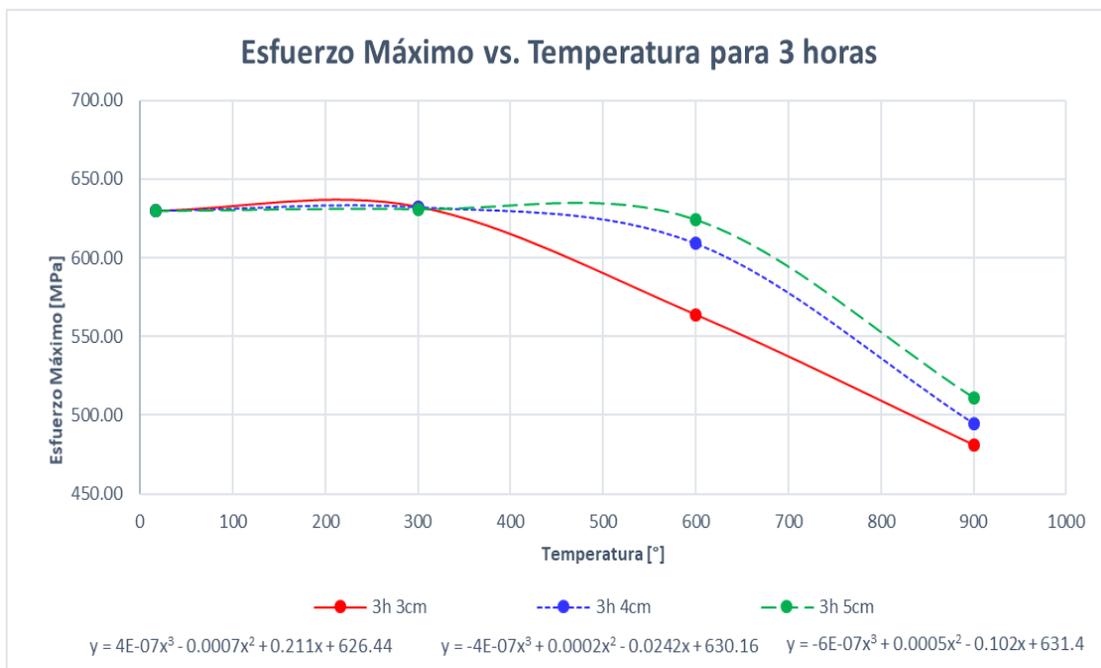


Figura 5.40 Relación esfuerzo máximo para 3h.

Fuente: (Pérez&Rosero)

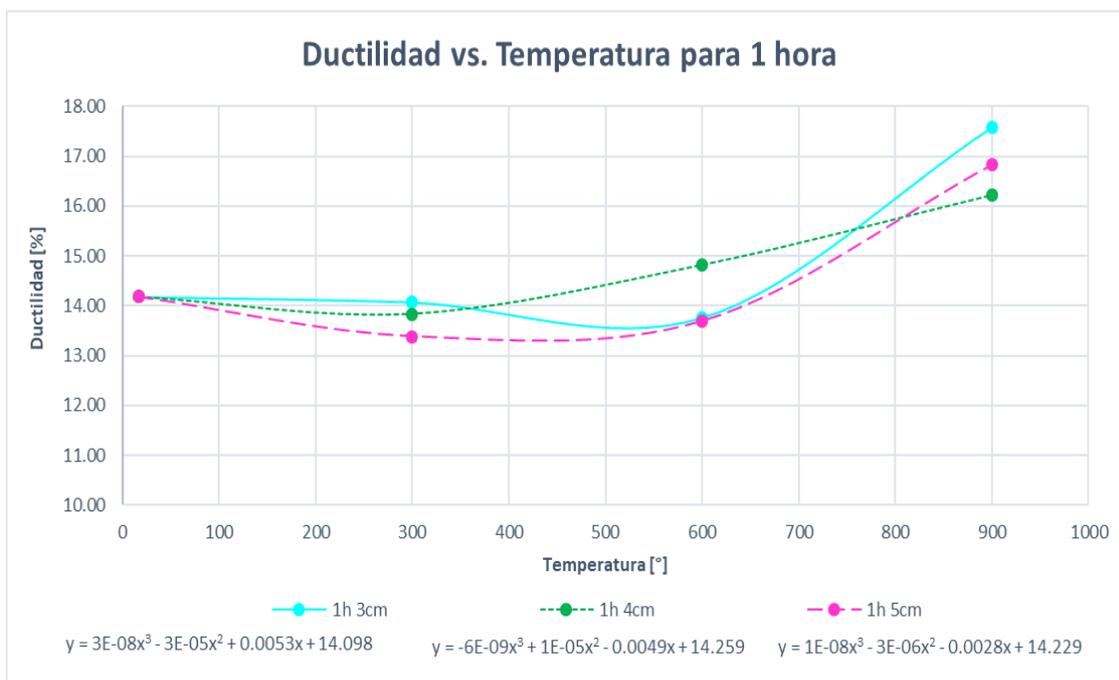
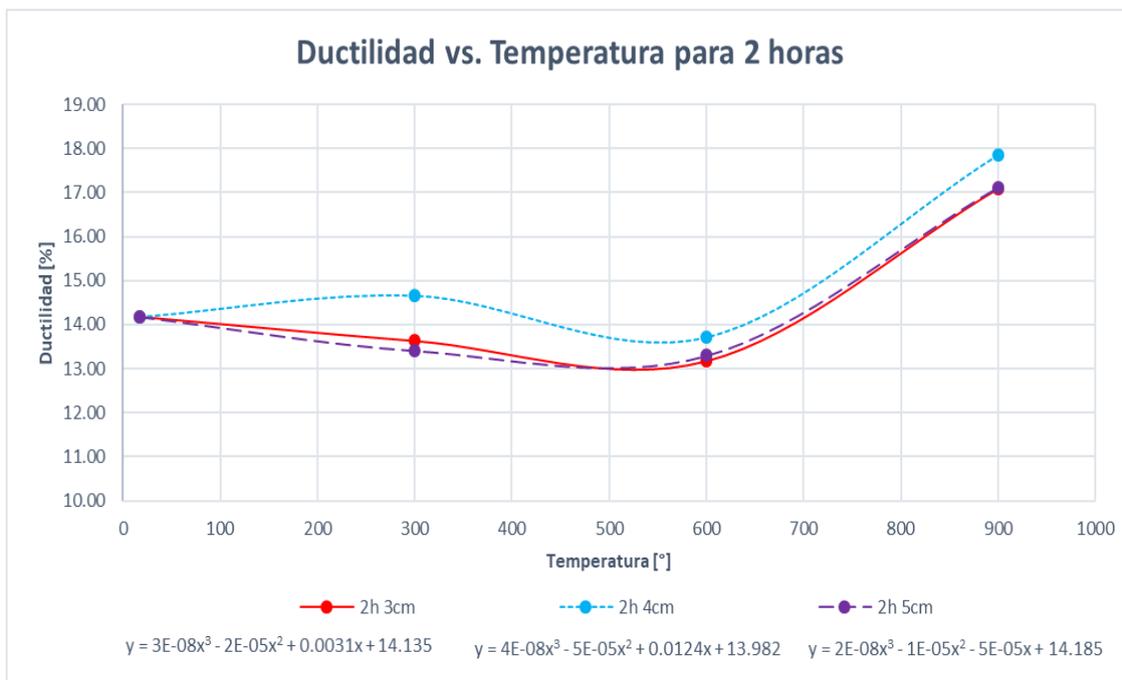


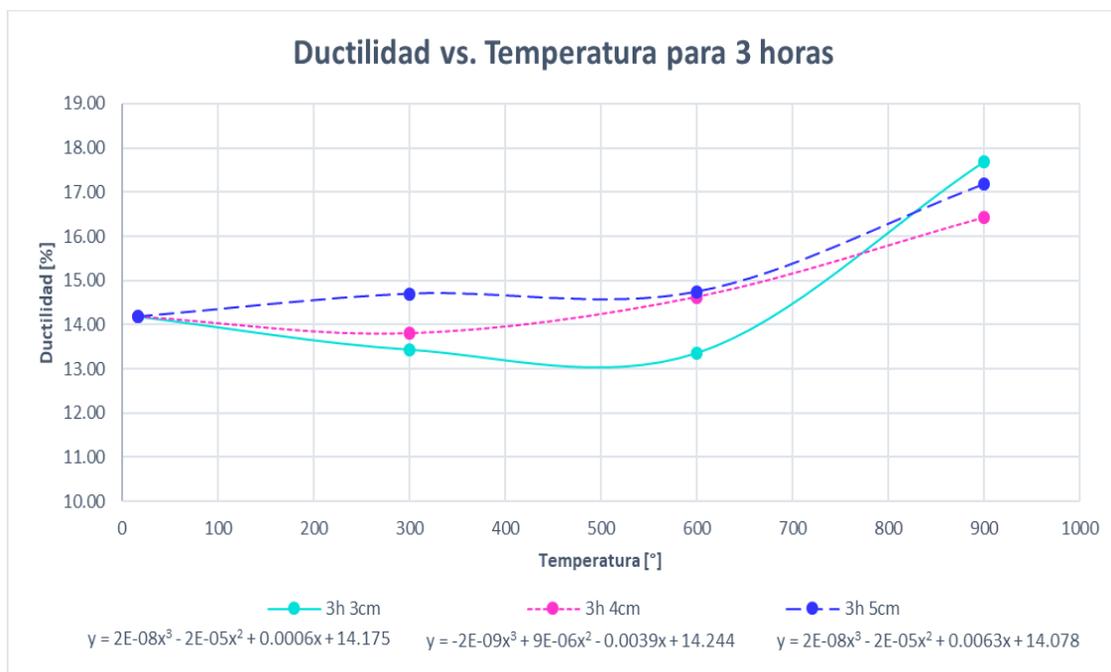
Figura 5.41 Relación ductilidad para 1h.

Fuente:(Pérez&Rosero)



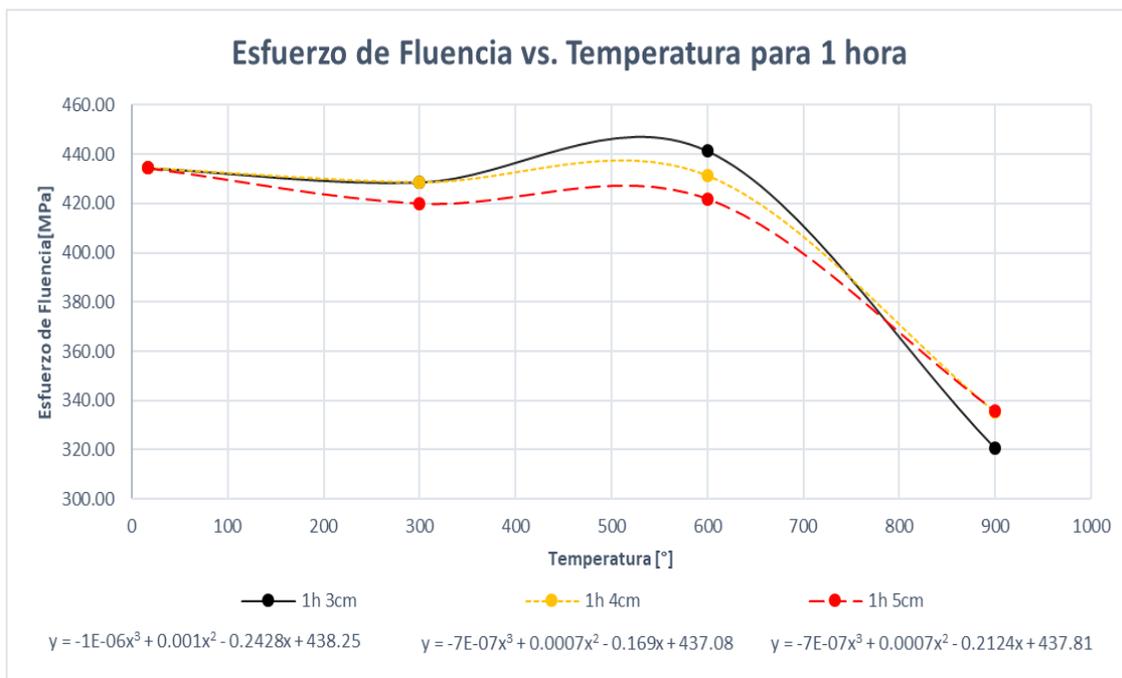
*Figura 5.42 Relación ductilidad para 2h.*

Fuente: (Pérez&Rosero)



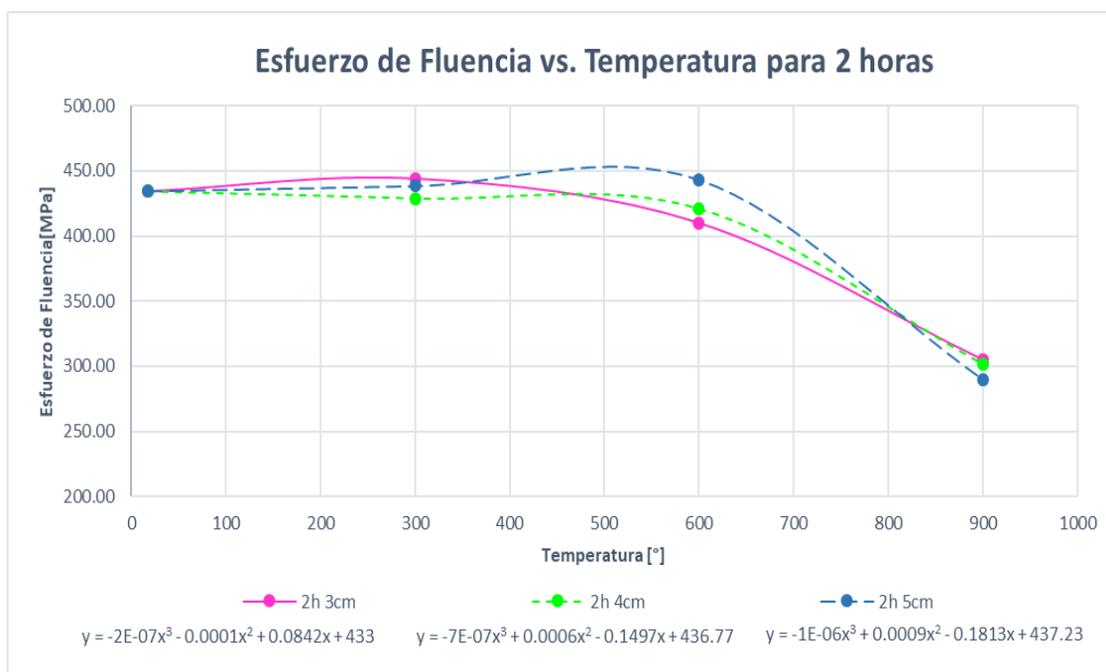
*Figura 5.43 Relación ductilidad para 3h.*

Fuente:(Pérez&Rosero)



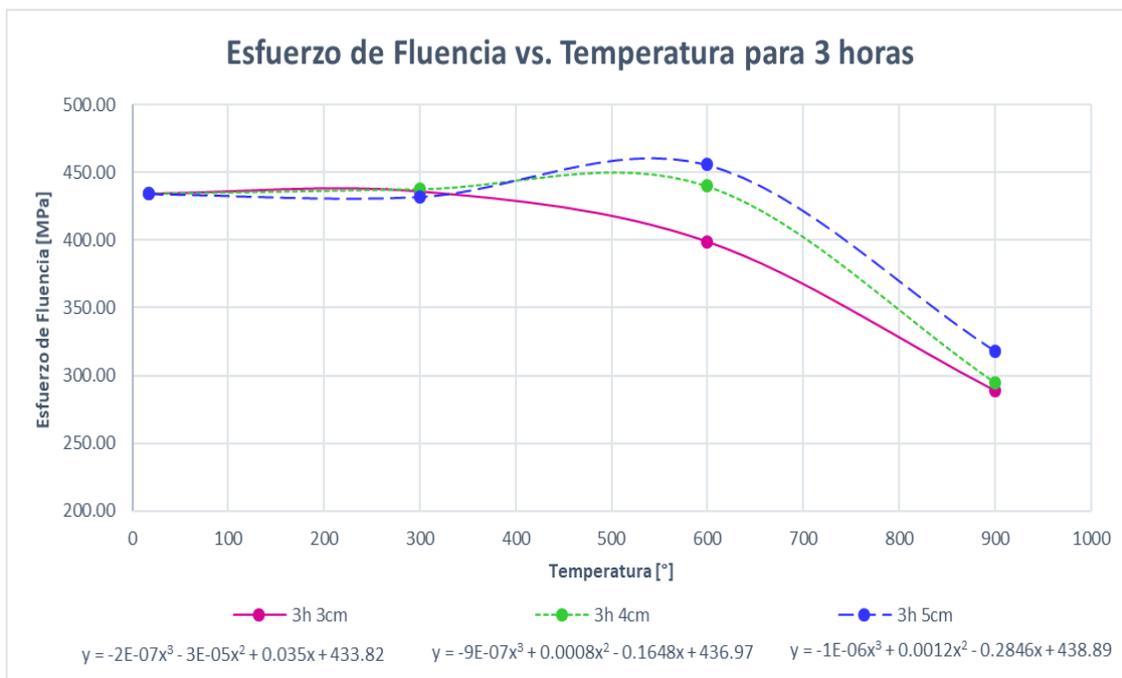
*Figura 5.44 Relación esfuerzo de fluencia para 1h.*

*Fuente:(Pérez&Rosero)*



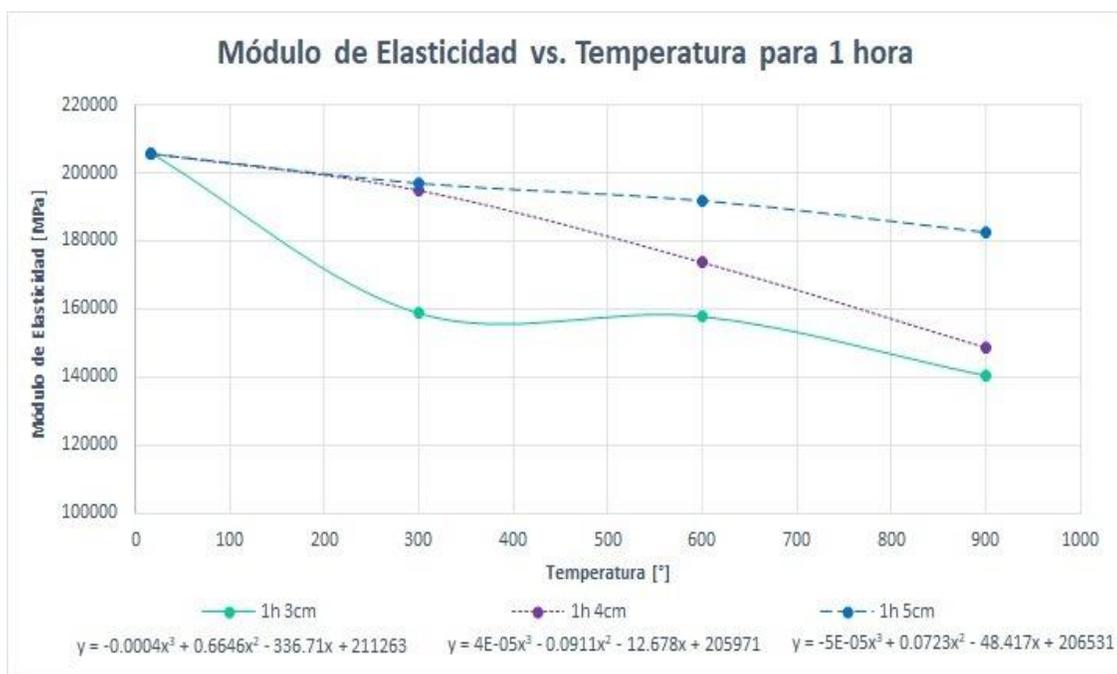
*Figura 5.45 Relación esfuerzo de fluencia para 2h.*

*Fuente:(Pérez&Rosero)*



*Figura 5.46 Relación esfuerzo de fluencia para 3h.*

*Fuente:(Pérez&Rosero)*



*Figura 5.47 Módulo de elasticidad para 1h.*

*Fuente:(Pérez&Rosero)*

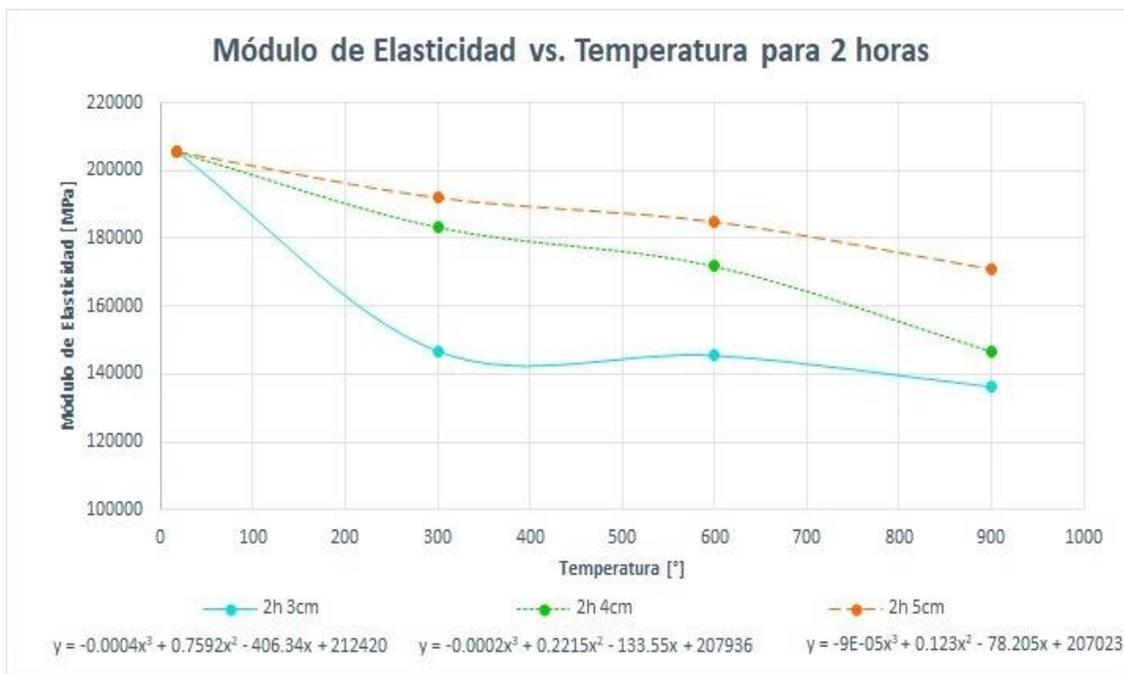


Figura 5.48 Módulo de elasticidad para 2h.

Fuente:(Pérez&Rosero)

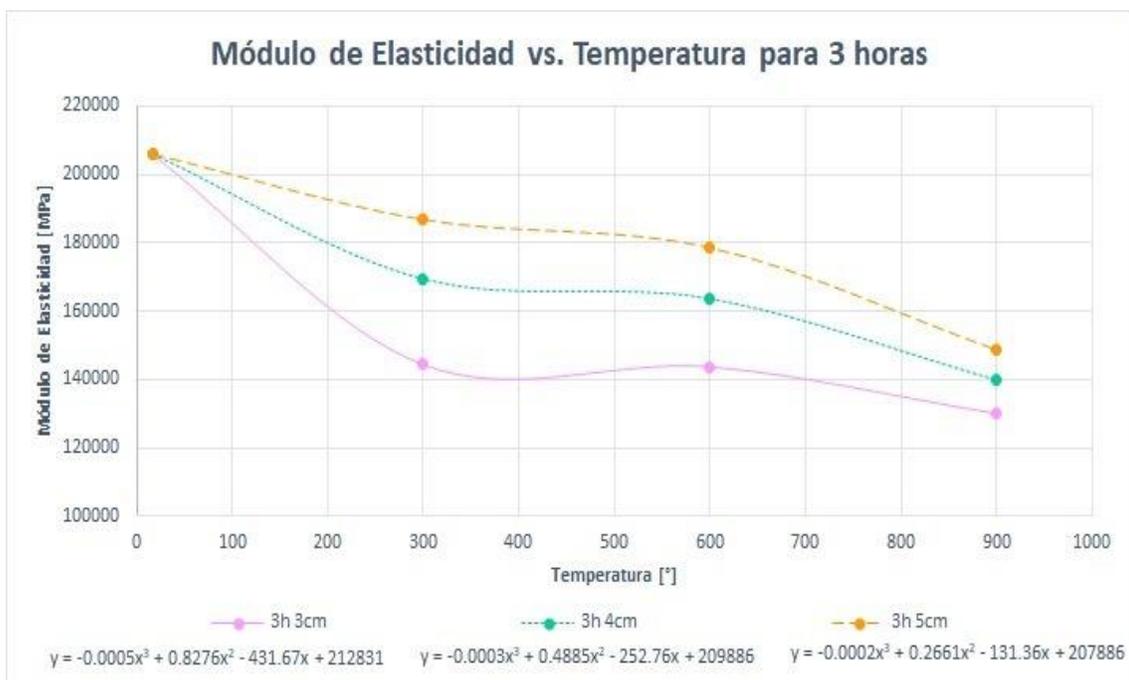


Figura 5.49 Módulo de elasticidad para 3h.

Fuente:(Pérez&Rosero)

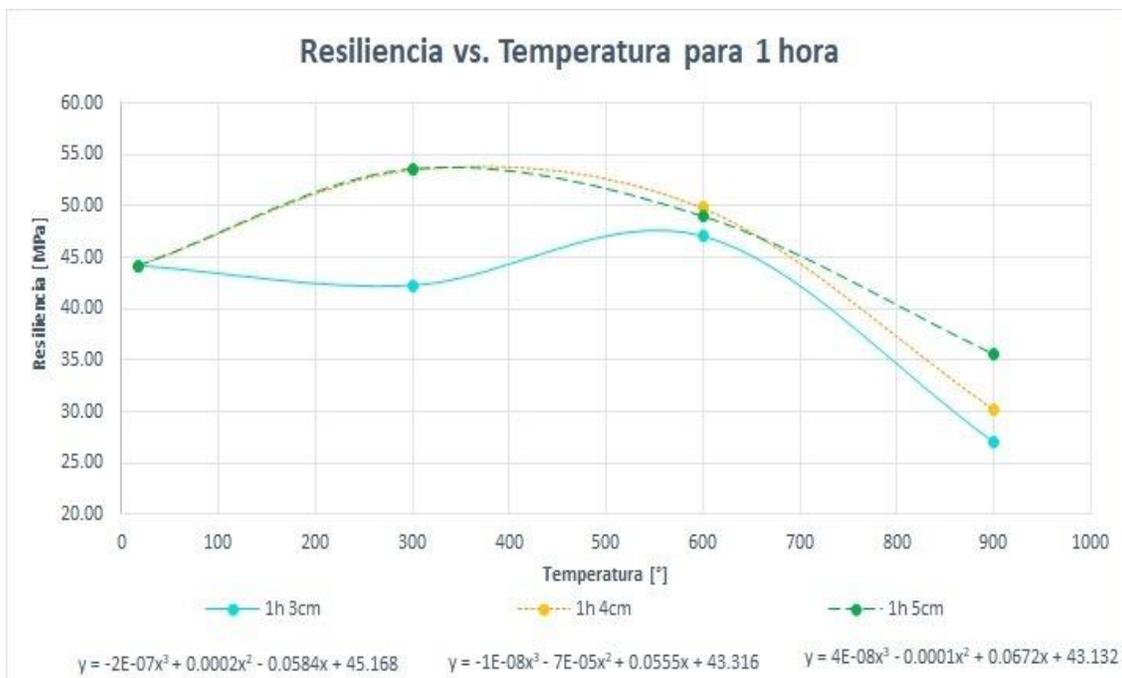


Figura 5.50 Resiliencia para 1h.

Fuente:(Pérez&Rosero)

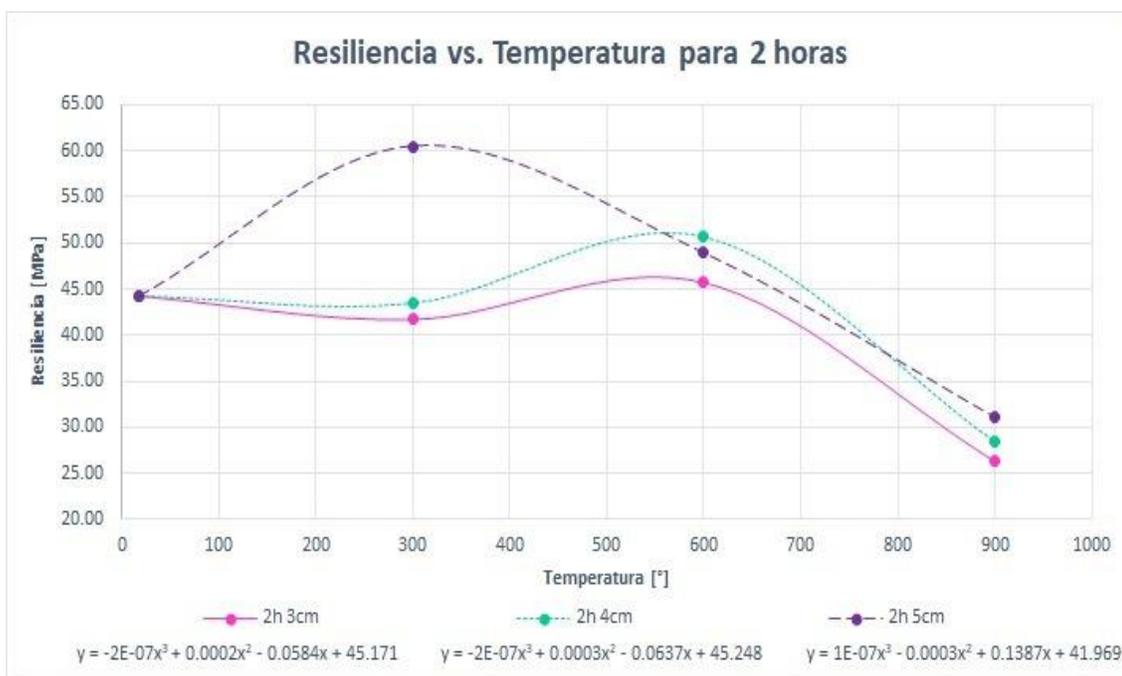
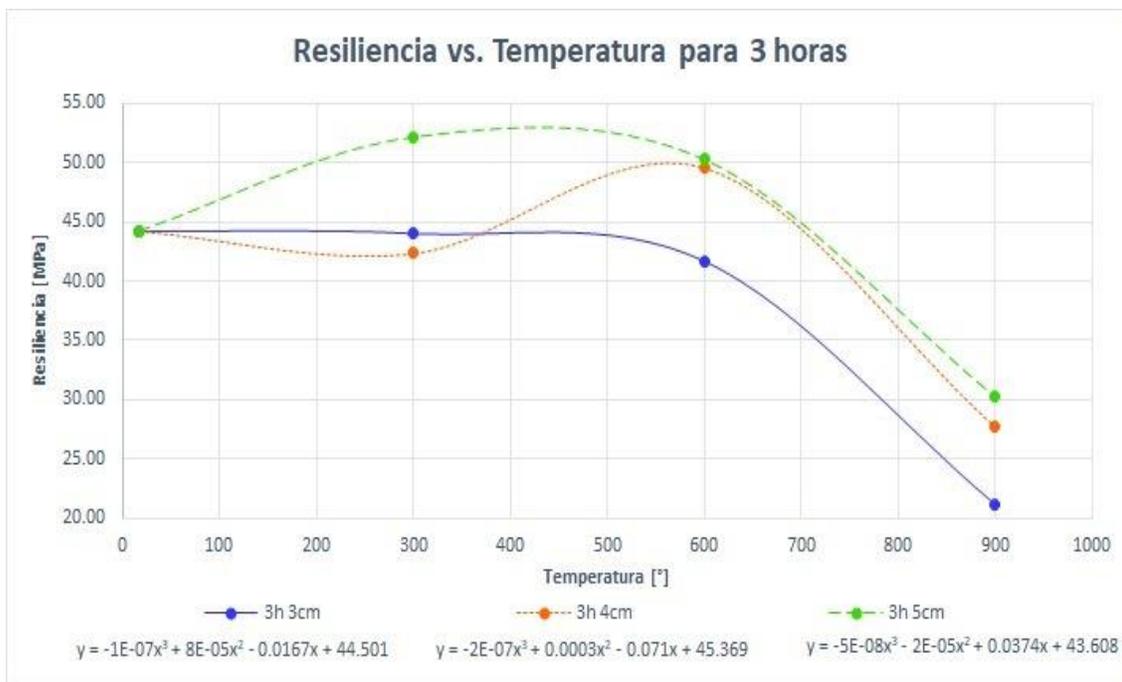


Figura 5.51 Resiliencia para 2h.

Fuente:(Pérez&Rosero)



*Figura 5.52 Resiliencia para 3h.*

*Fuente:(Pérez&Rosero)*

## CAPÍTULO 6

### 6. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

#### 6.1. CONCLUSIONES

- Finalizados los ensayos a compresión de cubos de mortero de 50mm de arista, se determinó que las muestras que estuvieron sometidas a más de 400°C durante dos horas de exposición, llegan a tener una resistencia de 23.73 MPa; que comparando con la Norma NTE-INEN 2380, ya no cumplen la resistencia mínima exigida de 28 MPa para un tiempo de curado de 28 días. Es decir, que para una estructura con estas condiciones (400°C – 2h), la resistencia estará fuera del rango admisible.
- Se evidenció que hasta los 200°C durante una hora de exposición, existe una mejora en la resistencia a compresión del mortero, ya que ésta aumenta hasta un 13%. Este comportamiento puede ocurrir debido a la pérdida de la humedad superficial o desecación, cuando las probetas están en el horno, provocando endurecimiento que genera una mejora en las propiedades mecánicas.
- En base a las figuras 5.4 y 5.5, se pudo observar que la resistencia a compresión disminuye conforme la temperatura y el tiempo de exposición aumenta, es decir, existe una relación inversamente proporcional, esto ocurre a partir de los 200°C dos horas.
- Con los datos de la tabla 5.5 se determinó que, la afectación máxima admisible para un mortero elaborado con cemento Tipo GU, para cumplir con la resistencia mínima a compresión indicada en la Norma NTE-INEN 2380 es en promedio del -15%; esto en base al resultado de 32.51 MPa, obtenido del mortero analizado en condicionales normales.

- En las figuras 5.2 y 5.3, se evidencia claramente que existe una relación directamente proporcional entre la temperatura, el tiempo de exposición y el área de fisuración; es decir que, conforme aumentan la temperatura y el tiempo de exposición, se generan tensiones internas por desecación que provoca aparición de fisuras.
- Al no contar con una norma que establezca cuál es el área de fisuración mínima o máxima para el mortero, se ha pensado en proponer un porcentaje de afectación máximo para el área total de fisuración, de los cubos que cumplan con la resistencia mínima establecida por la norma, que corresponde al 0.45% de fisuras total del área del elemento, esto es para garantizar que no influyan en el correcto desempeño del material.
- Se ha llegado a establecer que, para utilizar la relación matemática entre el área de fisuración y el esfuerzo a compresión del mortero, es necesario tener como datos base la temperatura aproximada y el tiempo de exposición del siniestro, de esta manera se conocerá las nuevas resistencias.
- El uso de la arena normal con una granulometría igual al de la arena Ottawa, mostró que las probetas del mortero cumplen la resistencia mínima que exige la Norma NTE-INEN 2380, concluyendo que se puede usar la arena normal con una granulometría ajustada y así disminuir costos que se ajustan más a lo real en obra.
- El encofrado de madera barnizada utilizado para la fabricación de los cubos de mortero, no cumplió con ciertos requisitos de la Norma NTE-INEN 488, como el material, número de compartimentos cúbicos y el número de piezas para ensamblaje; pero demostró que no afecta en el proceso de fraguado ni en el comportamiento mecánico del mortero, siempre y cuando tenga un ensamblaje preciso que garantice que no haya pérdidas de agua.
- Concluidos los ensayos a tracción de las varillas de acero de 50 cm de longitud, se estableció que las muestras que estuvieron sometidas a 900°C

durante una hora de exposición, llegan a tener una resistencia de 515.93 MPa; que comparando con la Norma NTE-INEN 2167, ya no cumplen la resistencia a tracción mínima exigida de 550 MPa. Es decir, que a partir de los 900°C, la resistencia estará fuera del rango admisible y el comportamiento mecánico comprometería el desempeño futuro de la estructura de hormigón armado.

- Para el caso de 300°C, indistintamente del tiempo de exposición y recubrimiento se observó que no existe una afectación al esfuerzo a tracción, ya que este aumenta un 0.98%. Concordando con el estudio “RESISTENCIA Y EFECTOS DEL FUEGO EN LAS ESTRUCTURAS DE HORMIGÓN ARMADO”, de autoría de Sebastián Villena Nicolau - Esteve Riba Genescá (2006), en la Universidad Politécnica de Cataluña, que menciona que las varillas no tienen una afectación en el cambio de la resistencia con temperaturas inferiores a 500°C.
- El esfuerzo a tracción en los 600°C comienza a verse afectado por el aumento de temperatura y tiempo de exposición; por ejemplo, cuando se tiene el menor recubrimiento, se alcanza esfuerzos de 554.30 MPa, 548.33 MPa y 563.85 para 1h, 2h y 3h respectivamente, pero aun así cumplen con el esfuerzo mínimo permitido por la Norma NTE-INEN 2167. Es decir, con mayor recubrimiento, el comportamiento es mejor.
- El recubrimiento tiene un significativo comportamiento de la resistencia a tracción del acero, en la figura 5.16 se observa que, si mayor es el recubrimiento, la afectación a esta propiedad es menor; siendo más evidente cuando las probetas fueron sometidas a los 600°C, en sus diferentes tiempos de exposición. El recubrimiento es en efecto, una capa protectora al acero de refuerzo.
- La ductilidad del acero de la varilla patrón dio como resultado 14.18%, que cumple con el alargamiento mínimo permitido por la Norma NTE-INEN 2167

de 14% para un diámetro 12 mm. Además, se concluye que hay una relación entre ductilidad y temperatura, mostrado en la figura 5.18, que conforme la temperatura asciende, la ductilidad aumenta; llegando a un valor máximo de 17.85% a los 900°C durante dos horas, con 4cm de recubrimiento. Por otro lado, el tiempo y el recubrimiento no muestran una clara relación de su afectación en los valores de la ductilidad, pero el acero se plastifica por el efecto de incendio.

- En la tabla 5.8 se señala los resultados del esfuerzo de fluencia; en base a ésta, se determina que las probetas que estuvieron expuestas a las condiciones de (600°C-2h-3cm), (600 figuras 5.20 y 5.22-3h-3cm) y todas las de 900°C, no cumplen con el rango aceptable del esfuerzo de fluencia (420 MPa a 540MPa) solicitado por la Norma NTE-INEN 2167. El acero se afecta seriamente.
- Es importante resaltar que las figuras 5.20 y 5.22, demuestran que el esfuerzo de fluencia no se altera uniformemente en función de la variación del tiempo de exposición y del recubrimiento.
- El impacto de la temperatura y del tiempo de exposición provocan un cambio indiscutible en el módulo de elasticidad comparado con el valor de varilla en condiciones estándar; pero el cambio permanece constante después de los 300°C una hora de exposición.
- Conociendo que el valor del módulo de elasticidad para el acero de refuerzo según la NEC-SE-HM es 200000 MPa, se comprueba que el módulo de la elasticidad de la muestra inicial es de 205729 MPa, por lo que cumple con este requisito.
- El módulo de elasticidad tiene una gran relación con el recubrimiento, como se demuestra en la figura 5.25, de manera que conforme el recubrimiento es mayor el módulo de elasticidad se ve menos afectado. Por ejemplo, tal es el caso de 600°C a una hora de exposición, se tiene valores de 157783 MPa,

173899 MPa y 191994 MPa, para 3cm, 4cm y 5cm de recubrimiento respectivamente.

- Analizada el área bajo la curva de la parte elástica en la curva esfuerzo-deformación, es decir la resiliencia; se determina que a los 300°C y 600°C el tiempo no influye en la disminución de esta propiedad. Es a partir de los 900°C, que se nota una pérdida notable en comparación al valor inicial.
- Del estudio se ha podido establecer que la temperatura de afectación interviene en el comportamiento de la resiliencia; existe un incremento a los 300°C con el mayor recubrimiento, en los 600°C vuelven a estabilizarse alrededor de su valor patrón y en los 900°C todos los valores disminuyen de manera considerable. Cabe señalar que el aumento del recubrimiento permite que la afectación sea menor.
- Los resultados respecto a la tenacidad no tienen una trayectoria uniforme en todas sus gráficas, por lo que no es posible realizar un análisis claro que ayude a determinar la tendencia que tiene esta propiedad en función del tiempo, la temperatura y el recubrimiento.
- Finalmente se concluye que, para utilizar la relación matemática que tiene cada propiedad del acero, es necesario conocer la temperatura y el tiempo al que fueron expuestos, además de su recubrimiento; y así determinar el estado actual de cada propiedad.

## 6.2. RECOMENDACIONES

- Se recomienda que el número de probetas de cubos de mortero de 50 mm de arista, sea al menos cinco muestras y no lo requerido por la norma NTE INEN 488, de forma que se indica que sea mínimo tres especímenes. Esto debido a que, si por algún motivo una de las probetas sufra daños antes del ensayo, se tenga probetas de respaldo.
- Para el ajuste de la granulometría de la arena de la cantera “La Roca” a la arena normalizada Ottawa, es importante realizar el proceso de secado, para que la humedad del material no interfiera en la cantidad de agua requerida para la fabricación de la mezcla.
- Es recomendable que el número de mezclas total sea el menor posible, de esta manera se evitará que éste sea un factor que intervenga en la variación o afectación de los resultados al momento de realizar los ensayos.
- Movilizar con precaución las muestras ya que, al momento de trasladar los especímenes de un laboratorio a otro, por el movimiento se pueden generar fisuras no propias del proceso de calentamiento y afectar a los resultados de área de fisuración.
- Contar con un buen equipo fotográfico que permita capturas imágenes claras de las caras de los cubos, para simplificar el proceso de trazado de fisuras; además procurar que el ángulo, distancia e iluminación, sean constantes.
- Considerar que la edad de las muestras no difiera significativamente entre ciclos de ensayos, ya que puede ser un factor que represente alteraciones en los resultados de resistencia a compresión de los cubos de mortero.
- Garantizar que todas las varillas a utilizarse en el estudio provengan de un mismo lote, debido a que al ser de diferente pueden variar en las propiedades mecánicas.

- Se sugiere que el número de vigas de hormigón armado sea superior a tres, debido a que la máquina de ensayos o el extensómetro pueden presentar irregularidades en su funcionamiento y esto genera un problema al momento de analizar los resultados.
- Investigar a fondo sobre algún método que permita conocer la tenacidad del acero de refuerzo, para determinar la relación que existe entre la tenacidad con la temperatura, el tiempo y el recubrimiento.
- Realizar un prototipo de encofrado si se utiliza un material diferente al recomendado por la norma, esto para verificar que no intervenga en el comportamiento mecánico de las propiedades de los materiales que se van a estudiar.

## CAPÍTULO 7

### 7. BIBLIOGRAFÍA

ABNT NBR 14432, 2000. (2000). *NBR 14432 Requisitos de resistencia al fuego de los elementos constructivos – Procedimiento*.

AFAM, A. n. (2003). *Morteros: Guía general*. Madrid: AFAM.

Alejandro Sánchez, F. J. (2002). *Historia, caracterización y restauración de morteros*. Sevilla: Universidad de Sevilla. doi:<http://dx.doi.org/10.12795/9788447221813>

Albornoz, S., Chereau, J.-P., & Simón, A. (2016). *Guía de Autoinstrucción N°1. El Fuego y los Incendios* (A. Ségeur (ed.); Primera). [http://www.anb.cl/documentos\\_sitio/81229\\_4\\_Guia\\_Fuego.pdf](http://www.anb.cl/documentos_sitio/81229_4_Guia_Fuego.pdf)

Alvarado Aguirre, G. J. (2016). *Estudio del comportamiento del concreto estructural espuesto al fuego*. Universidad Técnica de Ambato. Ambato, Ecuador.

Alvear, D., Rein, G., Lázaro, M., Capote, J. A., Torero, J. L., & Abreu, O. V. (2014). *Modelado y simulación computacional de incendios en la edificación* - Alvear, Daniel - Google Libros (2015 Ediciones Diaz de Santo (ed.)). [https://books.google.com.ec/books?id=xedvCQAAQBAJ&pg=PR14&dq=Modelado+y+simulación+computacional+de+incendios+en+la+edificación.+España&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjk\\_IPCmN\\_qAhUBQ80KHdm\\_BSYQ6AEwAHoECAAQAg#v=onepage&q=Fases del incendio&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=xedvCQAAQBAJ&pg=PR14&dq=Modelado+y+simulación+computacional+de+incendios+en+la+edificación.+España&hl=es-419&sa=X&ved=2ahUKEwjk_IPCmN_qAhUBQ80KHdm_BSYQ6AEwAHoECAAQAg#v=onepage&q=Fases del incendio&f=false)

ASTM C 845, 1996. (1996). *Standard Specification for Expansive Hydraulic Cement 1.04*, 1–3.

- Carrera, S., & Irigoyen, M. (2018). *Diseño estructural en condiciones de incendio del Sistema de entrepiso del edificio "Torino" aplicando un método de cálculo basado en la modelación estructural del edificio. Escuela Pólitecnica Nacional.*
- Castro, E., & Sánchez, R. (2019). *Análisis en laboratorio de los efectos en la resistencia a compresión y tracción de elementos estructurales de hormigón armado post afectación por altas temperaturas. Escuela Pólitecnica Nacional.*
- Covarrubias Navarro, M., & Ruvalcaba Ayala, F. R. (2015). *Degradación de Materiales de la Construcción Ante la Acción de Altas Temperaturas. Congreso Internacional De Ciencias De La Ingeniería, 2.*  
[https://www.researchgate.net/publication/303785438\\_Degradacion\\_de\\_Materiales\\_de\\_la\\_Construccion\\_Ante\\_la\\_Accion\\_de\\_Altas\\_Temperaturas/link/5751d74b08ae17e65ec36aae/download](https://www.researchgate.net/publication/303785438_Degradacion_de_Materiales_de_la_Construccion_Ante_la_Accion_de_Altas_Temperaturas/link/5751d74b08ae17e65ec36aae/download)
- CPE INEN 5 Parte 8, 2016. (2016). *Protección contra incendios. (INEN (ed.)).*  
[https://doi.org/10.1016/s0301-5629\(02\)00732-9](https://doi.org/10.1016/s0301-5629(02)00732-9)
- Ercolani, G. O. (2007). *Empleo de Ultrasonidos y Esclerometría en el diagnóstico de estructuras de hormigón afectadas por elevadas temperaturas. In P. A. Testing, IV Conferencia Panamericana de END. Buenos Aires. Retrieved from*  
<https://www.ndt.net/article/panndt2007/papers/37.pdf>
- Eurocode, 3. (1993). *Eurocode 3: Design of steel structures (Vol. 1, Issue 2005).*
- Flores Alés, V., Jiménez Bayarri, V., & Pérez Fargallo, A. (2018). *Influencia de la incorporación de vidrio triturado en las propiedades y el comportamiento a alta temperatura de morteros de cemento. In Boletín de la Sociedad Española de Cerámica y Vidrio (Vol. 57, pp. 257-265). Sevilla : Elsevier.*  
[doi:https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2018.03.001](https://doi.org/10.1016/j.bsecv.2018.03.001)

- Gere, J. M., & Goodno, B. J. (2013). *Mecánica de Materiales* (C. L. Editores (ed.); Octava). <http://publicaciones.unirioja.es>
- Gutiérrez de López, L. (2003). *El concreto y otros materiales para la construcción*. Manizales, Colombia: Universidad Nacional de Colombia. Obtenido de <http://www.bdigital.unal.edu.co/6167/>
- Guzmán, D. S. (2001). *Tecnología del concreto y del mortero*. Santafé de Bogotá: BhandarcEditores Ltda.
- Harmsen, T. (2005). *Diseño de Estructuras de Concreto Armado - Teodoro E. Harmsen - Google Libros* (Pontificia Universidad Católica del Perú (ed.); Cuarta). [https://books.google.com.ec/books?id=Gr3Ga9\\_\\_NB4C&pg=PA251&dq=hormigon+definicion&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjO2f3wmMjnAhUDrVkkHSFvCfAQ6AEIcDAI#v=onepage&q=hormigon definicion&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=Gr3Ga9__NB4C&pg=PA251&dq=hormigon+definicion&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwjO2f3wmMjnAhUDrVkkHSFvCfAQ6AEIcDAI#v=onepage&q=hormigon definicion&f=false)
- Holcim. (2016). *Evolución de la normas - Fabricación de Cemento*.
- Kosmatka, S. H. K. W. et al. (2004). *Diseño y control de mezclas de Concreto*. In *Journal of Experimental Botany* (Vol. 62, Issue 8).
- Luna, G. (2014). *Estudio del hormigón-Guía didáctica para el diseño de mezclas*. (Edicumbre (ed.); Primera).
- Maldonado Flores, J. L. (1996). *m •il\* H FACULTAD DE INGENIERIA MECANICA Y ELECTRICA [Universidad Autónoma de Nuevo León]*. <http://eprints.uanl.mx/421/1/1020118272.PDF>
- McCormac, J. C., & Csernak, S. F. (2012). *Diseño de estructuras de acero - 5a ed. - McCORMAC, Jack - Google Libros* (G. E. Alfaomega (ed.); Quinta). <https://books.google.com.ec/books?id=wgNLDgAAQBAJ&pg=PT8&dq=acero+es>

*tructural&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwj16Lai4HoAhUEVd8KHc0JBZIQ6AEIWjAH#v=onepage&q=acero estructural&f=false*

*NILSON, A. (2001). Diseño De Estructuras De Concreto. In McGRAW-HILL INTERAMERICANA (Vol. 12, Issue 5). <https://doi.org/10.1017/CBO9781107415324.004>*

*NTE INEN 152, 2010. (2010). CEMENTO PORTLAND. REQUISITOS. (Vol. 2007). [https://doi.org/10.1016/s0301-5629\(02\)00732-9](https://doi.org/10.1016/s0301-5629(02)00732-9)*

*NTE INEN 155, 2009. (2009). Cemento Hidraulico. Mezclado mecanico de pastas y morteros de consistencia plastica.*

*NTE INEN 2 502, 2009. (2009). Cemento Hidráulico. Determinación del Flujo en Morteros (INEN (ed.); Vol. 2502).*

*NTE INEN 2380:2011, 2002. (2002). Cemento hidráulico. Requisitos de desempeño para cementos hidráulicos. In Norma Inen 2380 - 2011 Instituto Ecuatoriano de Normalización (Vol. 1, Issue Primera Edición). <http://181.112.149.203/buzon/normas/2380.pdf>*

*NTE INEN 2500, 2009. (2009). Cemento Hidráulico. Especificaciones para la mesa de flujo usada en ensayos de cemento hidrùlico. (Vol. 1, Issue Primera Edición).*

*NTE INEN 2 518, 2010. (2010). Morteros para unidades de mamposteria. Requisitos.*

*NTE INEN 2551, 2011. (2011). Hormigón y mortero. Materiales secos combinados, ensacados para elaborar hormigón y mortero. (Vol. 2551).*

*NTE INEN 488, 2009. (2009). Cemento Hidraulico. Determinacion de las resistencia a la compresion de morteros en cubos de 50mm de arista. (Vol. 0488).*

- NTE INEN 490, 2011. (2011). *Cementos hidráulicos compuestos. Requisitos*. In NTE INEN 490. <https://archive.org/details/ec.nte.0490.2011/mode/2up>
- Orbe, L., & Zúñiga, P. (2013). *Optimización de la relación agua/cemento en el diseño de hormigones estándar establecidos en los códigos ACI-ASTM*.
- Ortega, E. O. (2001). *Programa de normalización de estudios previos y control de calidad en las intervenciones: morteros empleados en contrucciones históricas*. PH 34. Especial Monográfico: Museos, 78-89. doi:<https://doi.org/10.33349/2001.34.1136>
- Ortega García, J. E. (2014). *Diseño de estructuras de concreto armado - Ing. Juan Emilio Ortega García - Google Libros (M. EIRL (ed.); Primera)*. [https://books.google.com.ec/books?id=PwsvDgAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=dosificacion+hormigon&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwixy6K39s\\_nAhWRq1kKHUFwAyA4KBD0AQhjMAc#v=onepage&q&f=false](https://books.google.com.ec/books?id=PwsvDgAAQBAJ&printsec=frontcover&dq=dosificacion+hormigon&hl=es-419&sa=X&ved=0ahUKEwixy6K39s_nAhWRq1kKHUFwAyA4KBD0AQhjMAc#v=onepage&q&f=false)
- Ortiz, Á., & Villacís, E. (2002). *Estudio en laboratorio de los efectos de las altas temperaturas en el hormigón armado: Resistencia a flexión. (Tesis de pregrado)*. Escuela Politécnica Nacional, Quito, Ecuador.
- Páez, A. (1986). *Hormigón armado (S. A. Editorial Reverté (ed.); Primera)*. Reverté. [https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=5wfVaiKduB8C&oi=fnd&pg=PA25&dq=hormigon+armado+sometido+a+altas+temperaturas&ots=dg4hra5wbg&sig=LRp7XH\\_L2EYAQR2NFyLaHnpx-rg#v=onepage&q=hormigon+armado+sometido+a+altas+temperaturas&f=false](https://books.google.com.ec/books?hl=es&lr=&id=5wfVaiKduB8C&oi=fnd&pg=PA25&dq=hormigon+armado+sometido+a+altas+temperaturas&ots=dg4hra5wbg&sig=LRp7XH_L2EYAQR2NFyLaHnpx-rg#v=onepage&q=hormigon+armado+sometido+a+altas+temperaturas&f=false)
- Sánchez, M., Rebollo, D., Baldivieso, J., & Cáceres, R. (2002). *Informacion Tecnológica (J. Valderrama & C. Rojas (eds.))*. <https://books.google.com.ec/books?id=L7IA4NEC9pcC&pg=PA32&lpg=PA32&dq>

=Sánchez,+M.+.,Rebollo,+D.,+Baldivieso,+J.+.,+%26+Cáceres,+R.+(2002).+Info  
rmación+Tecnológica&source=bl&ots=vYyDX3XpWq&sig=ACfU3U1lkdmK0-  
1pj4hMRv4qzcvWN2z3v4A&hl=es&sa=X&ved=2ahUKEwiQs9ej

Schoch, R., & McNally, R. A. (2008). *El Misterio de la Pirámide de Keops: Los secretos de la Gran Pirámide y el nacimiento de la civilización*. Madrid: Edaf.

Ureña Aguirre, M. E., & Alvarado Aguirre, G. J. (2018). Efecto del tiempo de exposición al fuego en la resistencia a flexión de vigas de hormigón armado [Universidad Técnica de Ambato, Ecuador]. In *Gaceta Técnica* (Vol. 19, Issue 2). <https://doi.org/10.13140/RG.2.2.10804.35203>

Valencia, G. (2006). *Estructuras de acero. Introducción al diseño* (U. N. de Colombia (ed.); Primera). [https://books.google.com.ec/books?id=5AKRUzvdwxsC&pg=PP1&dq=Valencia,+G.+\(2006\).+Estructuras+de+Acero&hl=es419&sa=X&ved=2ahUKEwj74cfUh4DrAhUqUt8KHeCGDdlQ6AEwAHoECAyQAg#v=onepage&q=Valencia%2C](https://books.google.com.ec/books?id=5AKRUzvdwxsC&pg=PP1&dq=Valencia,+G.+(2006).+Estructuras+de+Acero&hl=es419&sa=X&ved=2ahUKEwj74cfUh4DrAhUqUt8KHeCGDdlQ6AEwAHoECAyQAg#v=onepage&q=Valencia%2C) G. (2006). *Estructuras de Acero*&f=false

Vega, L. y Burón, M; *Resistencia al fuego de estructuras de hormigón*. Madrid, España.

Villena, S., & Riba, E. (2006). *Resistencia y efectos del fuego en las estructuras de hormigón armado*. (Tesis de pregrado). Universidad Politécnica de Cataluña, Barcelona, España.

Virgili Grau, X. (2007). *COMPORTAMIENTO DE ELEMENTOS ESTRUCTURALES DE ACERO FRENTE A INCENDIO. ANÁLISIS DE LA NORMATIVA*. Universidad Politécnica de Cataluña. Barcelona, España.