

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

ESCUELA DE CIVIL

**TRABAJO PREVIO A LA OBTENCIÓN DEL TÍTULO DE
INGENIERO CIVIL**

“ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO MECÁNICAS DEL HORMIGÓN
CON LA ADICIÓN DE POLVO DE NEUMÁTICO RECICLADO CON CEMENTO
HOLCIM Y MINA DE PIFO”

AUTORES:

LUIS ALFREDO QUINAPALLO JAMI

MARLON ISRAEL CHECA YÁNEZ

Quito, 2020

DEDICATORIA

*A todos aquellos, que trabajan cada día, aportando nuevas formas para reducir
la contaminación ambiental.*

*A mis padres Elsa Jami y Luis Quinapallo,
por darme la oportunidad de estudiar en una institución de tan alto nivel como es la*

Pontifica Universidad Católica del Ecuador,

A mis hermanos Oscar Quinapallo y Nicole Quinapallo,

Y a mi hermano Raúl y mi Abuelito Aparicio que están en el cielo.

Luis Q.

*A mi madre, Margarita que siempre hizo hasta lo imposible para que
no abandone este camino.*

A mi padre, Humberto que siempre quiso que todos sus hijos sean profesionales.

*A mis hermanos, Diego que me debe estar viendo desde
el cielo cada paso que doy,*

*Stalin que siempre ha sido mi ejemplo a seguir y me ha perdonado
todos los errores que he cometido y Sebas que es mi compañero y mi apoyo.*

A mis sobrinos que me maten de iras, pero los amo.

Marlon C.

AGRADECIMIENTOS

A todos los profesores que formaron parte de mi formación académica.

A mi director Ing. Wilson Cando, a mi corrector de Ing. Celi Carlos.

Y un agradecimiento especial al Ing. Lara Lauro, por toda la ayuda prestada para el desarrollo de esta investigación.

A Carla Poveda por su ayuda.

Y a mi compañero de tesis Checa Marlon.

Luis Q.

Agradezco mi director de tesis Ing. Wilson Cando

por ser guía profesional y compañero.

A mis correctores Ing. Lauro Lara y

Ing. Carlos Celi por guiarme con sus conocimientos y experiencias a fin de poder dar un gran paso en mi vida.

A todos los ingenieros y compañeros que he

conocido a lo largo de mi vida,

en especial a Luchito Quinapallo quien me supo entender y ayudar en la culminación de este gran proyecto

Marlon C.

Contenido

1. Introducción	1
1.1. Tema.....	1
1.2. Justificación.....	1
1.3. Planteamiento del Problema.....	2
1.4. Objetivo General	3
1.4.1. Objetivos Específicos.....	3
1.5. Alcance.....	3
1.6. Hipótesis.....	4
1.7. Marco Teórico	4
1.7.1. Antecedentes	4
1.7.2. Marco Conceptual	5
1.8. Metodología	5
2. Caracterización de Insumos	7
2.1. Neumáticos.....	7
2.1.1. Neumáticos reciclados	7
2.1.2. Métodos de Recuperación de Neumáticos mediante la aplicación de Calor.....	7
2.1.1. Métodos de Recuperación de Neumáticos por Trituración.....	8
2.1.2. Proceso de trituración de Neumáticos reciclados.....	10
2.2. Hormigón	11
2.2.1. Consistencia del hormigón fresco	11
2.2.2. Mezclado	11

2.2.3. Trabajabilidad	12
2.2.4. Sangrado.....	12
2.2.5. Consolidación.....	13
2.2.6. Curado	13
2.3. Agua de amasado para el hormigón	14
2.3.1. Carbonato alcalino y bicarbonato.....	15
2.3.2. Cloruro	15
2.3.3. Sulfato	15
2.3.4. Otras Sales Comunes.....	15
2.3.5. Agua De Mar.....	16
2.3.6. Aguas Ácidas	16
2.3.7. Aguas Alcalinas	16
2.3.8. Aguas Negras (Residuales)	17
2.3.9. Aguas Con Sedimentos o Partículas En Suspensión.....	17
2.3.10. Interacción Con Los Aditivos	17
2.4. Áridos.....	17
2.4.1. Propiedades de los Áridos	18
2.4.2. Geología de Pifo.....	23
2.5. Cemento	25
2.5.1. Tipos de cemento Hidráulico (ASTM C 1157).....	25
2.5.2. Propiedades del Cemento	27

3. Metodología de la Investigación	29
3.1. Diseño y dosificación de mezclas de Hormigón	29
3.1.1. Dosificación Método ACI 211.1 (Modificado).....	30
3.1.2. Dosificación del hormigón con polvo de neumático reciclado	36
3.1.3. Propiedades mecánicas del hormigón endurecido	41
3.1.4. Resistencia del hormigón	45
4. Cálculos y Resultados	46
4.1. Propiedades de los agregados pétreos	46
4.1.1. Granulometría (ASTM C 136)	46
4.1.2. Material fino que pasa el tamiz N° 200 (ASTM C 117)	48
4.1.3. Gravedad Específica y absorción de los agregados (ASTM C 127 / C 128)	48
4.1.4. Peso Unitario y porcentaje de Vacíos (ASTM C 29).....	49
4.1.5. Equivalente de Arena (ASTM D 2419)	49
4.1.6. Contenido orgánico (ASTM C 40).....	49
4.1.7. Terrones de Arcilla (ASTM C 142)	50
4.1.8. Abrasión (ASTM C 131).....	50
4.1.9. Desgaste de los agregados pétreos a los Sulfatos (ASTM C 88)	50
4.2. Propiedades del Cemento	51
4.2.1. Gravedad específica (ASTM C 188).....	51
4.2.2. Finura Blaine (ASTM C 204)	51
4.2.3. Tiempo de fraguado Vicat (ASTM C 1005)	51

4.2.4. Expansión en el Autoclave (ASTM C 151)	52
4.2.5. Consistencia Normal del Cemento (ASTM C 187)	52
4.2.6. Resistencia a la compresión de Morteros Normalizados (ASTM C 109).....	53
4.3. Propiedades del Polvo de Neumático Reciclado.....	53
4.3.1. Contenido de Humedad (ASTM D 1864)	53
4.3.2. Partículas Ferrosas (INEN 2680)	53
4.3.3. Granulometría (ASTM D 5644).....	53
4.3.4. Porcentaje de Fibra (INEN 2680)	55
4.4. Ensayos del Hormigón en estado endurecido	56
4.4.1. Resistencia a la compresión (ASTM C 39).....	56
4.4.2. Resistencia a la flexión de viguetas (ASTM C 78).....	81
4.4.3. Determinación del Módulo de Elasticidad (ASTM C 469)	89
5. Conclusiones y Recomendaciones	96
5.1. Conclusiones	96
5.2. Comentarios	101
5.3. Recomendaciones.....	101
6. Bibliografía	102
7. Anexos.....	107

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1. Propiedades y Normativa de los Áridos.....	18
Tabla 2. Módulo Granulométrico de Áridos que siguen la parábola de Fuller.....	20
Tabla 3. Revenimientos recomendados para varios Tipos de Construcción.....	31
Tabla 4. Requisitos Aproximados de Agua de Mezcla y contenido de Aire para diferentes Revenimientos o Tamaños Máximos nominales de Agregado.....	31
Tabla 5. Dependencia entre la Relación Agua-Material Cementante y la Resistencia a Compresión del Concreto	32
Tabla 6. Dosificación $f'c$ esperado =210 kg/cm ² (a/c = 0,542).....	36
Tabla 7. Propiedades del hormigón (estado fresco) (a/c = 0,542)	36
Tabla 8. Dosificación $f'c$ esperado = 240 kg/cm ² (a/c = 0,493).....	36
Tabla 9. Propiedades del hormigón (estado fresco) (a/c = 0,493)	36
Tabla 10. Dosificación para una relación a/c=0,542 con 5% de PNR	39
Tabla 11. Propiedades del hormigón (Estado fresco) con 5% de PNR (a/c= 0,542)	39
Tabla 12. Dosificación para una relación a/c=0,542 con 15% de PNR	39
Tabla 13. Propiedades del hormigón (Estado fresco) con 15% de PNR (a/c=0,542)	39
Tabla 14. Dosificación para una relación a/c=0,542 con 25% de PNR	39
Tabla 15. Propiedades del hormigón (Estado fresco) con 25% de PNR (a/c=0,542)	39
Tabla 16. Dosificación para una relación a/c=0,542 con 35% de PNR	40
Tabla 17. Propiedades del hormigón (Estado fresco) con 35% de PNR (a/c=0,542)	40
Tabla 18. Dosificación para una relación a/c=0,493 con 5% de PNR	40
Tabla 19. Propiedades del hormigón (Estado fresco) con 5% de PNR (a/c=0,493)	40
Tabla 20. Dosificación para una relación a/c=0,493 con 15% de PNR	40
Tabla 21. Propiedades del hormigón (Estado fresco) 15% de PNR (a/c=0,493).....	40

Tabla 22. Dosificación para una relación $a/c=0,493$ con 25% de PNR	41
Tabla 23. Propiedades del hormigón (Estado fresco) con 25% de PNR ($a/c=0,493$)	41
Tabla 24. Dosificación para una relación $a/c=0,493$ con 35% de PNR	41
Tabla 25. Propiedades del hormigón (Estado fresco) con 35% de PNR ($a/c=0,493$)	41
Tabla 26. Granulometría agregado fino (arena triturada no lavada)	46
Tabla 27. Granulometría del agregado grueso (Piedra # 67)	47
Tabla 28. Material Fino que pasa el tamiz # 200	48
Tabla 29. Gravedad Específica y absorción Agregado fino (arena triturada no lavada)	48
Tabla 30. Gravedad Específica y absorción del Agregado grueso (Piedra # 67).....	48
Tabla 31. Peso unitario y porcentaje de vacíos del Agregado Fino	49
Tabla 32. Peso unitario y porcentaje de vacíos del Agregado Grueso	49
Tabla 33. Equivalente de arena	49
Tabla 34. Contenido orgánico de los agregados	49
Tabla 35. Terrones de Arcilla de los agregados pétreos	50
Tabla 36. Abrasión del Agregado grueso.....	50
Tabla 37. Desgaste del agregado grueso a los sulfatos	50
Tabla 38. Desgaste del Agregado fino a los sulfatos	51
Tabla 39. Gravedad específica del cemento (HOLCIM tipo GU)	51
Tabla 40. Finura Blaine (Cemento HOLCIM tipo GU)	51
Tabla 41. Tiempo de fraguado Vicat (Cemento HOLCIM tipo GU).....	52
Tabla 42. Expansión en el Autoclave (Cemento HOLCIM tipo GU).....	52
Tabla 43. Consistencia normal del cemento (Cemento HOLCIM tipo GU).....	52
Tabla 44. Resistencia a la Compresión de morteros Normalizados (Cemento HOLCIM tipo GU)	53
Tabla 45. Contenido de humedad del PNR	53

Tabla 46. Partículas Ferrosas del PNR.....	53
Tabla 47. Granulometría del PNR.....	54
Tabla 48. Contenido de fibra del PNR.....	55
Tabla 49. Resumen de resistencias promedio, características y desempeño de resistencia, a las edades de 7 y 28 días.....	76
Tabla 50. Resumen de resistencias de tracción por flexión de viguetas y comparación con esfuerzos a compresión.....	86
Tabla 51. Resumen de resultados de Módulo de Elasticidad calculados usando muestras obtenidas en laboratorio.....	89
Tabla 52. Resumen de valores de α calculados usando muestras obtenidas en laboratorio	92
Tabla 53. Resumen de valores de α calculados de acuerdo con los criterios de la ACI 318(α característico).....	94
Tabla 54. Resumen de propiedades y cumplimiento de los insumos.....	96
Tabla 55. Resumen de las propiedades del PNR.....	97

ÍNDICE DE GRÁFICAS

Gráfica 1. Gráfica Granulométrica del agregado fino (Arena triturada no lavada)	46
Gráfica 2. Gráfica Granulométrica del Agregado Grueso (Piedra # 67).....	47
Gráfica 3. Granulometría del polvo de neumático reciclado	54
Gráfica 4. Resistencia a la compresión de cilindros a la edad de 7 días	76
Gráfica 5. Desempeño de las resistencias para muestras con PNR para un diseño cuya relación $a/c = 0,542$	77
Gráfica 6. Desempeño de las resistencias para muestras con PNR para un diseño cuya relación $a/c = 0,493$	78
Gráfica 7. Resistencia a la compresión de cilindros a la edad de 28 días	79
Gráfica 8. Variación de densidad por la adición de PNR	79
Gráfica 9. Variación de la Resistencia Característica a la compresión por la adición de PNR a la edad de 28 días	80
Gráfica 10. Variación de la Resistencia promedio a la compresión por la adición de PNR a la edad de 28 días	80
Gráfica 11. Resistencia a la tracción por flexión de vigas a los 28 días	86
Gráfica 12. Variación de Esfuerzos de tracción por flexión de vigas promedio por la adición de PNR	87
Gráfica 13. Variación de Esfuerzos de tracción por flexión de vigas característica por la adición de PNR	87
Gráfica 14. Relación de Esfuerzos a tracción por flexión de vigas / Esfuerzo a compresión para una relación $a/c = 0,542$	88
Gráfica 15. Relación de Esfuerzos a tracción por flexión de vigas / Esfuerzo a compresión para una relación $a/c = 0,493$	88
Gráfica 16. Módulo de elasticidad para una relación $a/c = 0,542$	89

Gráfica 17. Módulo de elasticidad para una relación $a/c = 0,493$	90
Gráfica 18. Variación de los valores de Módulo de elasticidad característica por la adición de PNR.....	90
Gráfica 19. Cambio de los valores de Módulo de elasticidad promedio por la adición de PNR.....	91
Gráfica 20. α característico del hormigón para una relación $a/c = 0.542$	92
Gráfica 21. α característico del hormigón para una relación $a/c = 0.493$	93
Gráfica 22. Variación de los valores de α por la adición de PNR.....	93
Gráfica 23. A característico para una relación $a/c = 0.542$ calculado de acuerdo a ACI 318	94
Gráfica 24. Característico para una relación $a/c = 0.493$ calculado de acuerdo con ACI 318	95
Gráfica 25. Variación de los valores de α calculados de acuerdo con ACI por la adición de PNR.....	95
Gráfica 26. Análisis de la gráfica 7	98
Gráfica 27. Análisis de la gráfica 16	99
Gráfica 28. Análisis de la gráfica 17	100

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Componentes del hormigón	11
Figura 2. Relación entre incremento de resistencia y curado húmedo.....	14
Figura 3. Condiciones de humedad de las partículas de los áridos	22
Figura 4. Cantera de Holcim, Pifo	23
Figura 5. Formaciones principales de la zona de Pifo	24
Figura 6. Tipos de Falla en ensayo de compresión simple	42
Figura 7. Longitudes de aplicación de carga en el ensayo según la metodología indicada	43

ÍNDICE DE MAPAS CONCEPTUALES

Mapa Conceptual 1. Proceso de trituración de neumáticos fuera de uso.....	10
---	----

RESUMEN

La siguiente investigación, “Análisis de las Características Físico-Mecánicas del Hormigón con la Adición de Polvo de Neumático Reciclado con Cemento Holcim Y Mina de Pifo”, propone una alternativa para el uso de caucho en mezclas de hormigón. El caucho proveniente de neumáticos reciclados será incorporado en los diseños para mezclas de resistencia esperada $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$. Los agregados pétreos para esta investigación son procedentes de la mina de Pifo, el cemento utilizado es de la empresa Holcim tipo GU y la procedencia del caucho utilizado es de la empresa Rubberaction.

La caracterización y limitaciones de los agregados pétreos fue realizada de acuerdo con la metodología de la American Society for Testing Materials (ASTM). La metodología usada para el diseño de mezclas fue basada en la ACI comité 211, siendo esta modificada para el uso con materiales ecuatorianos del Distrito Metropolitano de Quito, mientras que, para el diseño de las mezclas con adición de polvo de neumático reciclado, se adaptó el diseño para reemplazar el agregado fino (Arena triturada no lavada) por polvo de neumático reciclado, tomando en cuenta para este reemplazo el volumen absoluto de estos materiales.

Se realizaron probetas cilíndricas para ser ensayadas a las edades de 7 y 28 días, a su vez, se realizaron viguetas a las edades de 28 días para cada uno de los porcentajes de reemplazo con polvo de neumático reciclado, los ensayos realizados para las muestras alteradas y no alteradas fueron, compresión simple de cilindros, módulo de elasticidad y flexión de viguetas.

Los resultados obtenidos en la rotura de las muestras alteradas y no alteradas fueron comparados para evaluar su comportamiento mecánico, dando como resultado una posible mejora de su resistencia a la compresión, con el uso de bajos porcentajes de polvo de neumático reciclado.

ABSTRACT

The following thesis research, "Analysis of the Physical-Mechanical Properties of Concrete with the Addition of Recycled Tire Powder with Holcim Cement and Pifo Quarry", proposes an alternative for the use of rubber in concrete mixtures. The rubber from recycled tires will be incorporated into the designs for mixtures of expected strength $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ and $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$. The stone material aggregates for this research are from the Pifo Quarry, the cement used is Holcim GU type and source of the rubber used is Rubberaction Company.

Characterization and limitations of stone material aggregates was performed according to the methodology of the American Society for Testing Materials (ASTM). The methodology used to design mixtures was based on ACI Committee 211; this was modified for its use with Ecuadorian materials of the Metropolitan District of Quito. Meanwhile for the design of mixtures with addition of powdered recycled tire, it was used an adapted design to replace the fine aggregate (crushed sand unwashed) for recycled crumb rubber, considering for this replacement the absolute volume of these materials.

Cylindrical test tubes were made to be tested at the 7th and 28th day respectively, consecutively; joists were made at the 28th day for each of the percentages of replacement with recycled tire powder, the tests performed for altered and unaltered samples were simple cylinder compression, modulus of elasticity and bending of joists.

The results obtained from the ruptures of the altered and unaltered samples were compared to evaluate their mechanical behavior, resulting in a possible improvement in their compressive strength, with the use of low percentages of recycled tire dust.

1. Introducción

1.1. Tema

ANÁLISIS DE LAS CARACTERÍSTICAS FÍSICO MECÁNICAS DEL HORMIGÓN CON LA ADICIÓN DE POLVO DE NEUMÁTICO RECICLADO CON CEMENTO HOLCIM Y MINA DE PIFO.

1.2. Justificación

En la actualidad la industria de la construcción busca fundamentalmente alcanzar el desarrollo sostenible, sin embargo, es evidente que el desarrollo urbano tiene como consecuencia impactos ambientales negativos, ya que implica un uso significativo de recursos naturales, y consecuentemente genera un alto volumen de desperdicios contaminantes, es por ello que personas y organizaciones buscan mediante investigaciones, mitigar los impactos ambientales de la construcción. Partiendo de esta premisa, en la actualidad se desarrollan investigaciones que se basan en la implementación de materias primas de reciclaje para su uso adecuado en la construcción, las cuales tiene como objetivo brindar calidad y economía, garantizando un comportamiento adecuado en el medio en el que se las utilice (Daza, 2010).

El uso de caucho molido proveniente de neumáticos reciclados en la industria de la construcción, aún es algo nuevo, ya que su uso actualmente se enfoca en la elaboración de mezclas asfálticas en frío con caucho vulcanizado triturado como aglutinante, una muestra de ello es su uso en España, país que cuenta con alrededor de 300 kilómetros de vía pavimentada con mezclas asfálticas usando polvo de neumático reciclado (Sofi, 2017).

La adición de polvo de neumático reciclado a mezclas de hormigón actualmente se encuentra en desarrollo, y se espera que a futuro se lo pueda utilizar para mitigar la contaminación que generan las llantas usadas, utilizando este material de naturaleza inorgánica por agregados que conforman las mezclas de hormigón.

En la actualidad se encuentra en vigencia el artículo N° 098 del Ministerio de Medio Ambiente, que obliga a los productores e importadores a recuperar el 20% de los neumáticos que ingresen al mercado nacional, para ello empresas como ECOCAUCHO que ha reciclado aproximadamente cerca de 250000 neumáticos desde su creación en el año 2013 hasta el día de hoy y GRIN (Gestión y Reciclaje Integral de Neumáticos) que produce material triturado de neumáticos reciclados, estas empresas garantizan la materia prima y se encargan del reciclaje de neumáticos en nuestro país.

En virtud de lo expuesto anteriormente, se plantea esta disertación para la obtención del título de ingeniero civil, con la finalidad de darle un uso adecuado a los neumáticos desechados, con la inclusión de este material a mezclas de hormigón.

1.3. Planteamiento del Problema

Debido al incremento del parque automotor en el mundo, la utilización de neumáticos crece día tras día produciendo un gran problema en cuanto a desechos de los mismo, ya que los neumáticos terminan en ríos, quebradas y otro porcentaje van a reciclaje. Los neumáticos tardan alrededor de 500 años en descomponerse (Líderes, 2018).

En Ecuador según SEGINUS (Sistema Ecuatoriano de Gestión Integral de Neumáticos Usados), en el año 2018, se descharon cerca de 2'400.000 de neumáticos, muchos de ellos terminarán en los bordes de las carreteras, terrenos baldíos, quebradas, ríos esteros y lagos. Se estima que en el mundo cada año 1000 millones de neumáticos alcanzan su vida útil, y actualmente se encuentran depositados o en vertederos cerca de 4000 millones de neumáticos solo en Estados Unidos y la Unión Europea (Sofi, 2017).

Los neumáticos almacenados representan un riesgo para la salud pública y el medio ambiente, contaminan el agua, aire y suelo. Por su forma particular y al ser impermeables, almacenan agua por largos períodos de tiempo, lo que genera un hábitat para la reproducción

de mosquitos y otras plagas. Dependiendo del medio en el que se encuentren y las condiciones a las que estén expuestas, los neumáticos pueden llegar a encenderse o corroerse, generando componentes químicos tóxicos y solubles, que contaminan el suelo y agua (Sofi, 2017).

Debido a la problemática del impacto ambiental que generan los neumáticos, con este trabajo se quiere implementar la adición del polvo de neumático reciclado en la fabricación del hormigón, ya que esto sería de gran ayuda a la industria de la construcción y se atenuaría significativamente el deterioro del medio ambiente, generado por los desechos de llantas.

1.4. Objetivo General

Realizar mezclas de hormigón con polvo de neumático reciclado, para evaluar su comportamiento en función de las propiedades físico-mecánicas.

1.4.1. Objetivos Específicos

- Obtener mezclas de hormigón que generen resistencias aproximadas de 210 kg/cm^2 y 240 kg/cm^2 , como muestra base de estudio (7 y 28 días).
- Determinar las propiedades físico-mecánicas del hormigón con añadidura de polvo de neumático reciclado en estado fresco y endurecido, y evaluar su aceptación en la industria de la construcción.
- Comparar los resultados entre las muestras de hormigón no alteradas de las muestras con añadidura de polvo de neumático reciclado.

1.5. Alcance

Evaluar el comportamiento del hormigón con polvo de neumático reciclado, ante los ensayos de compresión, flexión y módulo de elasticidad a las edades de 7 y 28 días. Donde se analizará la añadidura de distintos porcentajes de polvo de neumático reciclado a una mezcla de resistencia aproximada de $f'c \ 210 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c \ 240 \text{ kg/cm}^2$.

1.6. Hipótesis

Es posible que, mediante la utilización de distintos porcentajes de polvo de neumático reciclado, se obtenga una dosificación que cumpla con las propiedades físico-mecánicas requeridas para ser utilizada en construcción.

1.7. Marco Teórico

1.7.1. Antecedentes

Las investigaciones para el uso de neumáticos reciclados se remontan al año 1970, el cual se comenzó a utilizar para el sellado de fisuras de pavimento, como ligantes en superficies, etc. sin embargo es evidente que su uso es reducido si lo comparamos con la cantidad de material generado. (Ambientalex, 2018)

En vista de los problemas que existen con varios residuos, el impacto ambiental existente en el mundo ha aumentado, por tal motivo la humanidad ha optado por el reciclaje.

Uno de los mayores contaminantes en el mundo son los neumáticos ya usados, de esta manera a partir del reciclaje los neumáticos han pasado a ser materia prima de varios nuevos productos como tejas, en la revista *Construction and Building Materials* se utilizó caucho reciclado como agregado fino para utilizarlo en pavimentos y cumplir con las propiedades necesarias (Flores, Flores, & Hernández, 2016).

En el área de pavimentos, en la Pontificia Universidad Católica del Ecuador se realizó la investigación “UTILIZACIÓN DE GRÁNULOS DE CAUCHO TRITURADO DE NEUMÁTICOS FUERA DE USO EN MEZCLAS ASFÁLTICAS EN FRIO CON EMULSIÓN Y MATERIAL FRESADO” realizado por la estudiante Morante Belén utilizando material triturado de la empresa RUBBERACTION, obteniendo pérdidas de estabilidad y aumento de flujo, por debajo de lo establecido en las normas ASTM 1560, y se concluyó que no puede ser utilizado como sustituto de agregado nuevo y se recomienda el uso de este material en el rango de 1 a 3% del peso de los agregados de la briqueta de diseño (Morante, 2019).

Mientras que en investigaciones realizadas en mezclas de hormigón con la añadidura de polvo y gránulos de neumático reciclado, como “Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete” y “ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL CONCRETO, SUSTITUYENDO PARCIALMENTE EL AGREGADO FINO POR CAUCHO MOLIDO RECUBIERTO CON POLVO CALCÁREO” presentan en sus resultados, en los ensayos de compresión y flexión, una disminución gradual de su resistencia con el aumento de la cantidad de caucho desmenuzado y pulverizado, reemplazando ripio y cemento por su volumen absoluto en cantidades de 2,5 al 12,5%, también se presentaron reducciones en el módulo de elasticidad entre el 20 y 30% en comparación a la muestra inalterada.

Dado estos datos investigativos la tesis se enfocará en la obtención y análisis de resultados con los materiales existentes en la ciudad de Quito, reemplazando el material fino (arena triturada no lavada) por polvo de neumático triturado en volumen absoluto.

1.7.2. Marco Conceptual

1.7.2.1. Polvo de Neumático Reciclado

Polvo de neumático reciclado se obtienen mediante un proceso mecánico, por rasgado, con dos cilindros ranurados.

Este residuo es muy resistente a la degradación, que puede durar hasta 500 años, por lo que es incompatible con los rellenos sanitarios. Además, tanto los neumáticos fuera de uso como las fibras de caucho se convierten en un ambiente propicio para la procreación de insectos. Si se quema, el residuo produce un humo nocivo a la salud humana, ya que contiene petróleo en su composición (GRIN, Gestión de Reciclaje Integral de Neumáticos, 2018).

1.8. Metodología

La investigación contendrá una recopilación bibliográfica sobre hormigón, caucho de neumáticos reciclados, y normas para el diseño de mezclas con materiales ecuatorianos.

Se realizará un diseño de hormigón tradicional con una resistencia a la compresión esperada $f'c$ 210 Kg/cm² y $f'c$ 240 Kg/cm² (muestras patrón) para posteriormente compararlos con hormigones con polvo de neumático reciclado.

Las muestras alteradas con añadidura de polvo de neumático reciclado comprenderán los siguientes porcentajes:

Mezclas	Agregado fino	Polvo de neumático reciclado
Patrón	100%	0%
1	95%	5%
2	85%	15%
3	75%	25%
4	65%	35%

Fuente: Propia

Teniendo un total de 10 dosificaciones. Por cada dosificación se realizarán 13 muestras, 10 cilindros y 3 viguetas, para un total de 100 cilindros y 30 viguetas. Los ensayos para los cilindros se realizarán a las edades de 7 y 28 días, y las viguetas serán ensayadas a los 28 días. Por cada dosificación se ensayarán 5 cilindros para compresión simple a los 7 días, 5 ensayos para compresión simple de los cuales se elegirían 3 cilindros para módulo de elasticidad a los 28 días, y 3 viguetas para flexión a los 28 días.

Se realizará el análisis comparativo entre las mezclas patrón y las mezclas con añadidura de polvo de neumático reciclado, finalmente se analizarán las mejoras o deficiencias del hormigón sometido a esta alteración en su dosificación.

2. Caracterización de Insumos

2.1. Neumáticos

Los neumáticos son estructuras tubulares formadas principalmente de caucho natural, cauchos sintéticos (SBR), aceites minerales, fibras (hilos de acero y textiles), capaces de soportar el peso de un vehículo y su carga (Energíanuclear, 2010).

2.1.1. Neumáticos reciclados

Según el ministerio del Ambiente, anualmente en el Ecuador son desechados alrededor de 3 millones de neumáticos, de los cuales 1,5 millones son reciclados y el otro millón y medio son incinerados o depositados en acantilados, ríos, basureros etc. En respuesta a la alta contaminación generada por el desecho de neumáticos, el Ministerio de Medio Ambiente (MAE) dictó el Acuerdo ministerial N° 098 (Plan de Gestión Integral de los Neumático Usados) que obliga a los productores e importadores de neumáticos a recuperar alrededor del 20% de la totalidad de neumáticos que ingresan al mercado (Alarcón, 2018).

2.1.2. Métodos de Recuperación de Neumáticos mediante la aplicación de Calor

2.1.2.1. Termólisis

La termólisis es la separación de compuestos (en al menos dos) por la acción de someter al elemento a un aumento de temperatura, para lo cual, los neumáticos son sometidos a un aumento de temperatura en condiciones anaerobias, el neumático al estar sometida a estas condiciones, presenta una destrucción de sus enlaces químicos para obtener así hidrocarburos sólidos y gaseosos que son parte del compuesto original de los neumáticos, y poder así ser utilizados en la producción de nuevos neumáticos (Esteve, 2012).

2.1.2.2. Pirólisis

La Pirólisis se conoce como la descomposición química de la materia orgánica, exceptuando metales y vidrios, al someter un elemento a un aumento de temperatura en condiciones anaerobias, evitando la producción de dioxinas y furanos que son muy contaminantes para el medio ambiente. Los neumáticos al ser sometido a este proceso producen GAZ, que es un gas similar al propano usado para la producción de aceites industriales que, al ser refinados, pueden ser utilizados en diésel y acero (Esteve, 2012).

2.1.2.3. Incineración

La incineración es la conversión de la materia orgánica en cenizas por acción de la combustión en un medio aerobio. La aplicación de este proceso en neumáticos resulta muy costoso y contaminante, ya que, durante la incineración; se liberan altas cantidades de gases como monóxido de carbono, óxido de nitrógeno, etc., además de policiclos altamente cancerígenos. Este proceso, puede generar grandes cantidades de energía eléctrica que se pueden utilizar para el desempeño de actividades industriales, pero por su alta contaminación, no resulta rentable su proceso de reciclado (Esteve, 2012).

2.1.1. Métodos de Recuperación de Neumáticos por Trituración

2.1.1.1. Trituración Criogénica

La trituración criogénica se basa en someter los neumáticos a temperaturas de hasta -195 °C en un sistema cerrado al vacío, para lo cual es necesarios el uso de nitrógeno líquido en forma de espuma criogénica, convirtiendo al caucho (presente en los neumáticos) en frágil y quebradizo. A pesar de obtener un muy buen producto, el reciclaje de neumáticos por este método es muy costoso y complejo (Esteve, 2012).

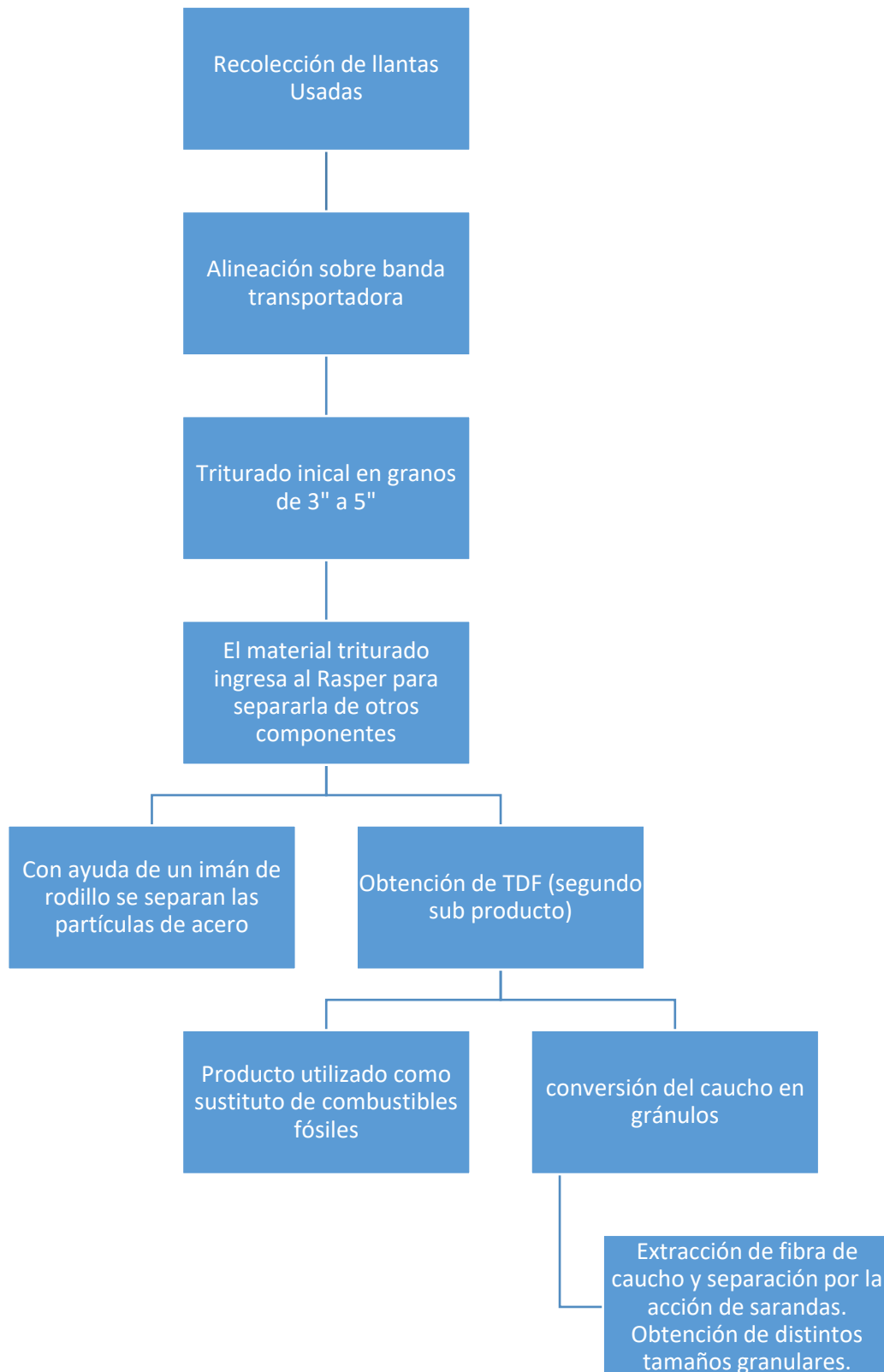
2.1.1.2. Trituración Mecánica

Este proceso convierte los neumáticos en gránulos de diferente granulometría por acción de máquina trituradoras, separando el acero y las fibras textiles. El producto obtenido por trituración de neumáticos tiene un sin número de usos, entre los productos que destacan son pisos de gimnasio, mosquetas para autos, rodapiés, y para mejorar el amortiguamiento en canchas de fútbol sintéticas.

En la industria de la construcción se usa en mezclas de asfalto, y actualmente se encuentra en investigaciones para su uso en hormigones estructurales ligeros.

2.1.2. Proceso de trituración de Neumáticos reciclados

Mapa Conceptual 1. Proceso de trituración de neumáticos fuera de uso



Fuente: Proceso de trituración de neumáticos (Eraso, 2015)

2.2. Hormigón

El hormigón (concreto) es una mezcla compuesta de pasta y agregados. La pasta se compone de cemento portland y agua que, al endurecerse, por reacción química se une con los agregados grueso (grava) y fino (arena) para crear una masa semejante a una roca (piedra artificial) (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Las características físicas del hormigón como la reología y fraguado pueden ser modificadas y controladas por la inclusión de aditivo en la mezcla hormigón, de acuerdo con las necesidades requeridas por el fabricante.

Figura 1. Componentes del hormigón



Fuente: (Kosmatka et al., 2004, pág 1)

2.2.1. Consistencia del hormigón fresco

El hormigón recién mezclado deberá tener una consistencia plástica o semifluida, la cual dependerá de la cantidad de agua que contenga la mezcla, esta condición estará dada de acuerdo a los requerimientos de diseño, de tal manera que, el hormigón pueda ocupar todos los vacíos del molde (encofrado) y los agregados se encuentren distribuidos de forma homogénea. Durante su transporte y colocación, los materiales que conforman la mezcla no se deben segregar.

2.2.2. Mezclado

El mezclado tiene como finalidad, cubrir superficialmente los agregados con la pasta cementante, y está directamente relacionado, con la homogeneidad y uniformidad del

hormigón. La secuencia de colocación de los materiales que conforman el hormigón puede influir en la producción de una mezcla homogénea de buena calidad, sin embargo, no se establece un tipo de secuencia específica, por lo que, se pueden realizar ajustes principalmente en el momento de colocación del agua (Kosmatka et al., 2004).

El tiempo de mezclado se establece desde el instante en que el cemento, agua y agregados, son colocados en el tambor hasta su descarga, y su duración, dependerá de la velocidad, capacidad y tipo de posición del eje de rotación de la mezcladora (inclinado u horizontal).

2.2.3. Trabajabilidad

La trabajabilidad describe cuan fácil se puede mezclar, colocar, consolidar y terminar el hormigón en estado fresco con pérdidas mínimas de homogeneidad y que resista la segregación.

Factores como el transporte, cantidad, calidad y forma de los materiales, consistencia, contenido de aire, humedad de la mezcla y temperatura, influyen directamente con la trabajabilidad del hormigón.

La consistencia se considera como principal indicador de trabajabilidad, la cual se cuantifica con el asentamiento o revenimiento medida por el cono de Abrams. Un asentamiento bajo, describe una consistencia seca, difícil de colocar y compactar, a su vez, un asentamiento alto, describe una consistencia húmeda, más fácil de colocar, pero con alta probabilidad de segregación, por lo que se debe encontrar un equilibrio en la consistencia la cual permita una fácil colocación y que evite la segregación (Kosmatka et al., 2004).

2.2.4. Sangrado

El sangrado (exudación), es la tendencia del agua a subir a la superficie del hormigón recién vaciado, por acción de la sedimentación de las partículas con mayor densidad como es el caso del cemento y agregados. La exudación es un proceso normal del hormigón, y si esta es baja,

ayuda a controlar la fisuración del hormigón cuando este se contrae, por otro lado, si la exudación es alta, en virtud de la ganancia de agua en la superficie, la relación agua-cemento en esta zona aumenta, en consecuencia, la capa superficial tiende a volverse débil y porosa (Kosmatka et al., 2004).

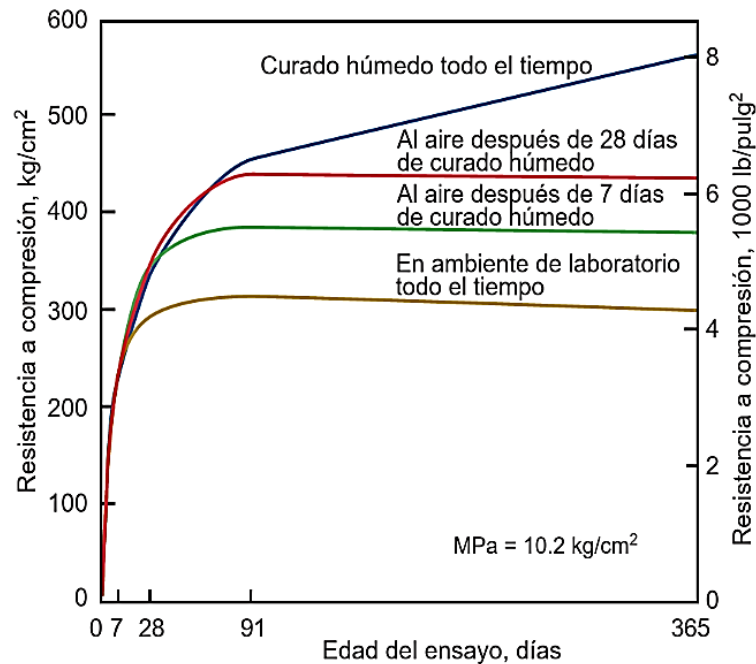
2.2.5. Consolidación

La consolidación es el proceso de colocación y compactación del hormigón en estado fresco dentro de un molde, y estará relacionada directamente con la granulometría de los agregados, siendo más fácil de consolidar las mezclas con una buena gradación. Existen métodos manuales y mecánicos para la consolidación, destacando la vibración mecánica como el método más efectivo. La vibración reduce el rozamiento de partículas permitiendo así el uso de mezclas rígidas. Una buena consolidación da como resultados una mejor calidad de mezcla, a su vez, una mala consolidación resulta en un hormigón débil y poroso de mala calidad (Kosmatka et al., 2004).

2.2.6. Curado

El curado es la rehidratación del hormigón ya colocado en el molde, mediante el cual se intenta brindar condiciones de humedad y temperatura óptimas para su adecuado endurecimiento. Para ello se debe mantener saturado el hormigón de tal forma que, cuando comience su período de secado, se hidrate nuevamente y la resistencia vuelva a aumentar. Por tanto, a mayor tiempo se mantenga adecuadamente húmedo el hormigón, se puede obtener mayor resistencia (Kosmatka et al., 2004).

Figura 2. Relación entre incremento de resistencia y curado húmedo



Fuente: (Gonnerman & Shuman, 1928)

2.3. Agua de amasado para el hormigón

El agua de amasado juega un papel muy importante en las etapas de mezcla e hidratación del hormigón, en la mezcla, la cantidad de agua está directamente ligada con la trabajabilidad, y en consecuencia, con la facilidad que el hormigón es correctamente puesto en obra, también es indispensable para una correcta hidratación y así asegurar su adecuado endurecimiento, sin que esta afecte el tiempo de fraguado, la resistencia del hormigón, la corrosión del refuerzo y la durabilidad del hormigón.

El agua utilizada en la mezcla y curado del hormigón deben ser aptas para desempeñar con eficacia su función, generalmente el agua natural a usarse deberá ser potable con bajos niveles de olor y sabor. Las normas que califican la aceptación de aguas dudosas para ser utilizadas en mezclas y límites químicos, para aguas de lavado usadas con agua de mezcla son; ASTM C 94 (AASHTO M 157) y AASHTO T 26.

Es permitido el uso de agua con menos de 2000 ppm de sólidos disueltos, caso contrario, se deberá realizar un estudio para determinar la incidencia en el tiempo de fraguado y su resistencia (Kosmatka et al., 2004).

A continuación se describen los efectos producidos por ciertas impurezas sobre el agua de mezcla.

2.3.1. Carbonato alcalino y bicarbonato

Estas sales tanto el carbonato como el bicarbonato de sodio, pueden acelerar o retardar el tiempo de fraguado, al encontrarse en gran concentración, disminuyen la resistencia del hormigón, por lo que, cuando esta concentración supera los 1000 ppm, se deben realizar ensayos que permitan determinar su influencia en el hormigón (Kosmatka et al., 2004).

2.3.2. Cloruro

El cloruro está directamente ligado a problemas de corrosión del refuerzo, mas no se toma en cuenta sus efectos directos sobre el hormigón. La concentración aceptable de cloruro en el agua es de 20,000 ppm y está limitada por las normas ACI 318.

2.3.3. Sulfato

La concentración alta de sulfato en el agua provoca reacciones expansivas potenciales y el deterioro del hormigón, sin embargo, es aceptable una concentración de 10,000 ppm en el agua que será utilizada para la mezcla y estará limitada por la norma ASTM D 516 (Kosmatka et al., 2004).

2.3.4. Otras Sales Comunes

El magnesio y carbonato de calcio son sales que se encuentran en algunas aguas municipales, y normalmente en el medio no se encuentran concentraciones altas que sean suficientes para afectar la resistencia del hormigón, sin embargo, es aceptable una

concentración de estas sales no más de 25,000 ppm para ser usada en la mezcla de hormigón (Kosmatka et al., 2004).

2.3.5. Agua De Mar

Las aguas de mar están conformadas de $\frac{3}{4}$ de cloruro de sodio y $\frac{1}{4}$ de cloruro, así como también sulfato de magnesio disueltas con una concentración de hasta 35,000 ppm. El agua de mar puede ser usada para hormigones no armados ya que, su potencial de corrosión de armadura es muy elevado. Es bien sabido que este tipo de sales afectan en la disminución de la resistencia del hormigón, por lo que, para su uso, se deberá tomar en cuenta el uso de un cemento con moderada resistencia a sulfatos y que la relación agua-cemento a ser usada en diseño, sea menor para compensar la pérdida de resistencia por el uso de estas aguas (Kosmatka et al., 2004).

2.3.6. Aguas Ácidas

La acidez del agua a utilizarse en una mezcla de hormigón está definida por el pH, sin embargo, esta medida no describe cual es el efecto potencial de los ácidos en el hormigón, un pH menor a 3 pueden generar problemas de trabajabilidad, y las aguas con concentraciones altas de ácido (clorhídrico, sulfúrico, tánico, etc.) son perjudiciales para la resistencia del hormigón cuando estas son mayores a 10,000 ppm (Kosmatka et al., 2004).

2.3.7. Aguas Alcalinas

Las aguas alcalinas son aquellas que tienen concentraciones de hidróxido de sodio en peso de cemento, si esta concentración se encuentra por debajo del 5% tienen una incidencia mínima sobre la resistencia del concreto y tiempo de fraguado, mientras que aquellas que tienen una concentración de hasta 1,2% reducen la resistencia de hormigón (Kosmatka et al., 2004).

2.3.8. Aguas Negras (Residuales)

Generalmente estas aguas contienen 400 ppm de materia orgánica que, al ser tratadas adecuadamente, esta concentración se reduce a 20 ppm, la cual es muy baja para afectar al hormigón (Kosmatka et al., 2004).

2.3.9. Aguas Con Sedimentos o Partículas En Suspensión

Las aguas que tienen partículas suspendidas como rocas o arcillas con una concentración hasta 2000 ppm son aceptables para el agua de mezcla, si esta cantidad supera este límite, puede influir en algunas propiedades del hormigón como la trabajabilidad, pero no influyen en la resistencia. Cuando estas aguas son muy lodosas, es recomendable que hayan pasado por un proceso de sedimentación y así disminuir la cantidad de sólidos suspendidos (Kosmatka et al., 2004).

2.3.10. Interacción Con Los Aditivos

Anteriormente se mencionaron rangos de tolerancia para aguas con algún tipo de contaminante, sales, sólidos o algún componente químico para poder ser usadas como agua de mezcla, sin embargo, este rango de tolerancia se ve afectado y será modificado con la adición de aditivo a nuestro diseño de mezcla, por lo que se deben realizar ensayos adicionales para verificar que las mezclas junto con el aditivo no sufran efectos desfavorables para nuestra mezcla de hormigón (Kosmatka et al., 2004).

2.4. Áridos

Los áridos utilizados para la elaboración del hormigón son la arena (agregado fino), Gravas (agregado grueso) de origen natural o piedra triturada y escorita cuyas características, resistencia, forma, durabilidad etc., sean adecuadas para el hormigón (Jiménez, 1973).

Cuando se requiere una durabilidad alta para medios muy agresivos, es necesario utilizar agregados como gravas y arenas de río, agregados de origen volcánico como calizas y dolomitas. Estas rocas, de las cuales son provenientes los áridos, contienen dentro de su estructura otros minerales y se clasifican por su origen en ígneas, sedimentarias o metamórficas.

Para definir si un agregado es grueso o fino se debe analizar el tamaño de su partícula, siendo así llamados agregados finos a las partículas que tengan un tamaño máximo de 9.5 mm y agregados grueso aquellas cuyas partículas sean retenidas en el tamiz N° 16 (1,18 mm.) y no sean mayores que 150 mm, sin embargo, este rango es muy amplio ya que generalmente el agregado grueso más empleado es aquel cuyo diámetro se encuentre entre 19 y 25 mm.

Los agregados deben cumplir con normas de calidad que garanticen su limpieza, resistencia, durabilidad y ausencia de productos químicos. Los agregados que presenten un revestimiento de materiales finos como arcilla, y que se encuentran adheridas a materiales porosos y blandos, afectan a la adherencia de la pasta y la resistencia del hormigón.

2.4.1. Propiedades de los Áridos

Tabla 1. Propiedades y Normativa de los Áridos

Propiedades	Normativa
Granulometría	ASTM C 136
Material más fino que pasa el tamiz N° 200	ASTM C 117
Contenido orgánico	ASTM C 40
Resistencia a la Abrasión	ASTM C 131
Gravedad Específica y Densidad	ASTM C 127
Absorción	ASTM C 70
Peso unitario & porcentaje de vacíos	ASTM C 29
Desgaste a los sulfatos	ASTM C 88

Fuente: Propia

2.4.1.1. Granulometría

La Granulometría es el fraccionamiento de las partículas de un agregado a través del análisis de tamices, generalmente este análisis se basa en conseguir una curva granulométrica que se obtiene al pasar el agregado pétreo por tamices de diferente diámetro. La curva granulométrica ayudará a determinar la eficiente gradación del material a utilizarse, determinar el tamaño máximo nominal de los agregados y fijar límites granulométricos. La granulometría define la forma en que las partículas de los agregados se acomodan dentro del hormigón y estará relacionada con la cantidad de agua y cemento, trabajabilidad, contenido de vacíos, retracción y durabilidad del hormigón (Kosmatka et al., 2004).

Es necesario mencionar que no existe una curva granulométrica ideal, pues de acuerdo a cada autor, pueden haber varias curvas granulométricas ideales y replicarlas implicaría un alto costo, sin embargo, se puede relacionar el módulo de finura del agregado con cualquier curva ideal para determinar el proporcionamiento óptimo de agregado grueso o fino y si este es adecuado o no.

2.4.1.2. Material fino que pasa el tamiz N° 200

Generalmente las partículas de los agregados que pasan el tamiz N° 200 (75 μm) se los considera limos y arcillas que se encuentran adheridas a las partículas de mayor tamaño, este revestimiento afecta la unión entre el árido y la pasta cementante. Otra consecuencia del exceso de material más fino que el tamiz N° 200 es su afectación directa con la demanda de agua, ya que la presencia excesiva de este material aumenta la relación agua cemento y en consecuencia se obtiene una menor resistencia del hormigón, según la ASTM C 33 los límites para el material fino que pase el tamiz N° 200 no debe superar el 5% pero si este es manufacturado puede llegar al 7%.

2.4.1.3. Módulo de Finura (MF)

El módulo de finura de los agregados fino y grueso se calcula de acuerdo a lo especificado en las normas ASTM C 125, que es la suma de los porcentajes acumulados de material retenido en cada uno de los tamices que se especifican dividido para 100, estos tamices son N° 100, N° 50, N° 30, N° 16, N° 8, N° 4, 3/8", 3/4", 1 1/2", 3", 6", y representa el índice de finura del agregado. Entre mayor sea el MF el tamaño de las partículas del agregado es más grueso. El MF de los agregados finos nos ayuda a determinar la proporción de arena y ripio para el hormigón (Kosmatka et al., 2004).

La proporción adecuada de agregado fino y grueso se puede determinar tomando como referencia una curva ideal granulométrica que se encuentra en función del tamaño máximo del agregado, para así encontrar un módulo granulométrico teórico que cumpla con las dimensiones de nuestro agregado. A continuación, se muestra un ejemplo tomando en cuenta la curva ideal de Fuller.

Tabla 2. Módulo Granulométrico de Áridos que siguen la parábola de Fuller

Tamaño máximo de un árido en mm	25	30	35	40	45	50	55	60	65	70
Módulo granulométrico	5,21	5,45	5,64	5,82	6,00	6,16	6,29	6,40	6,51	6,60

Fuente: Hormigón Armado (Jiménez, 1973)

Se elige un módulo granulométrico de acuerdo con el tamaño máximo nominal, y junto con los módulos de finura del agregado grueso y fino se determinará la cantidad (en porcentaje) de grava y arena que requiere nuestra mezcla con la siguiente fórmula.

$$mt = (MFf * \frac{x}{100}) + (MFg \frac{y}{100}) \quad (1)$$

$$X + Y = 100 \quad (2)$$

Donde:

mt = Módulo granulométrico teórico

MFf = Módulo de finura del agregado fino

MFg = Módulo de finura del agregado grueso

$x = \text{porcentaje del agregado fino}$

$y = \text{porcentaje del agregado grueso}$

2.4.1.4. Contenido orgánico

El contenido orgánico de los agregados es la presencia de contenido de origen animal o vegetal, las cuales se forman principalmente de carbono, nitrógeno y agua. El límite de tolerancias de materia orgánica dentro del agregado es de 500 ppm, si la presencia de contenido orgánico es muy alta, propiedades como la resistencia, durabilidad y tiempo de fraguado se verán afectadas en gran medida. Para determinar la presencia de contenido orgánico se debe realizar el ensayo de calorimetría de los agregados de acuerdo a la norma ASTM C 40 (Kosmatka et al., 2004).

2.4.1.5. Resistencia a la abrasión

La resistencia a la abrasión de un agregado generalmente representa un índice de calidad del material, cuyo valor será de mucha importancia cuando este se encuentre sometido al desgaste como ocurre en plantas con prestaciones para maquinaria industrial o en pavimentos. También durante la ejecución de la mezcla de hormigón, al ser colocado dentro de una mezcladora, se puede incrementar la presencia de finos y alterar la relación agua-cemento ya que genera una demanda de agua. Esta propiedad se la puede determinar de acuerdo a la norma ASTM C 131 (Kosmatka et al., 2004).

2.4.1.6. Gravedad Específica y Densidad

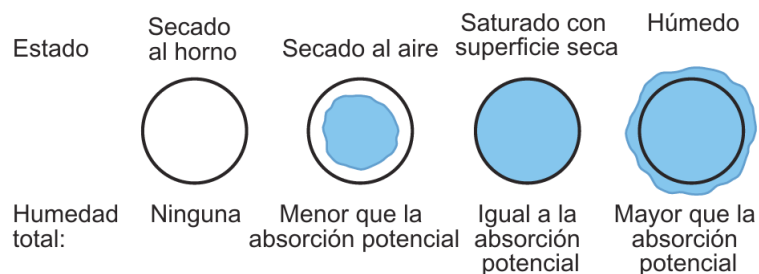
La gravedad específica es la relación entre la densidad de un agregado y la densidad del agua a temperatura ambiente (20 a 25 °C), y se la usa en algunos cálculos de proporcionamiento y control de la mezcla, en el diseño de mezcla por el método de volumen absoluto, en general mayor parte de los agregados pétreos presenta un valor de gravedad específica de 2,4 a 2,9. La masa específica o densidad, se la determina multiplicando el valor de gravedad específica por la densidad del agua cuyo valor aproximado es de 1000 kg/m³ (1 gr/cm³) y su valor se encuentra

entre 2400 y 2900 kg/m³. Esta propiedad se la puede determinar de acuerdo a la norma ASTM C 127 y C 128 (Kosmatka et al., 2004).

2.4.1.7. Absorción y Humedad Superficial

La Absorción de un agregado es la capacidad de los áridos de absorber agua hasta que los poros internos de las partículas de los agregados se saturen, a este estado se lo conoce como superficie saturada seca. Este valor nos ayudará a determinar la masa correcta de los materiales para una mezcla. Las condiciones de humedad de los áridos se representan en la siguiente figura.

Figura 3. Condiciones de humedad de las partículas de los áridos



Fuente: Diseño y Control de Mezclas de Concreto PCA (Kosmatka et al., 2004)

Esta propiedad se la puede determinar de acuerdo con la norma ASTM C 70 (Kosmatka et al., 2004).

2.4.1.8. Peso unitario y porcentaje de vacíos

El peso unitario de un agregado es la masa necesaria para llenar un envase con un volumen unitario específico, este volumen representa la porción de agregados y vacíos entre partículas.

La cantidad de vacíos afecta directamente en la demanda de pasta cementante. La forma y textura superficial de las partículas de agregado está relacionada con la cantidad de espacios vacíos, por lo que se recomienda mejorar la granulometría para disminuir este valor. Esta propiedad se la puede determinar de acuerdo con la norma ASTM C 29 y C 1252 (Kosmatka et al., 2004).

2.4.1.9. Desgaste a los Sulfatos

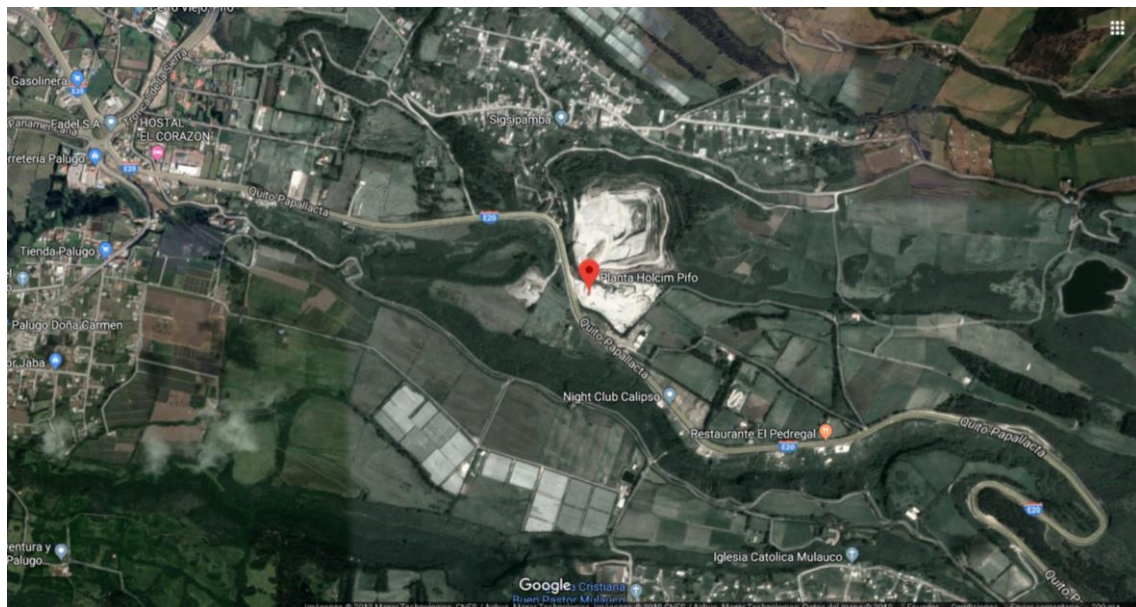
Uno de los factores que afectan la durabilidad del hormigón es el ataque químico por acción de agentes externos o internos, dentro de la gama de químicos afectantes se considera al Sulfato de magnesio como uno de los más perjudiciales, ya que afecta directamente el Aluminato Tricálcico que se encuentra presente en el cemento y, a menudo se encuentra presente en los agregados pétreos por la acción de agentes climáticos. Esta propiedad se la puede determinar de acuerdo con la norma ASTM C 88 (Garzón, 2013).

2.4.2. Geología de Pifo

2.4.2.1. Ubicación

Esta mina se encuentra ubicada en la Provincia de Pichincha, Cantón Pifo, al sur-este de la ciudad de Quito, Av. Interoceánica, 170175. Sus coordenadas georreferenciales son -0.245289 Latitud y -78.314397 Longitud.

Figura 4. Cantera de Holcim, Pifo



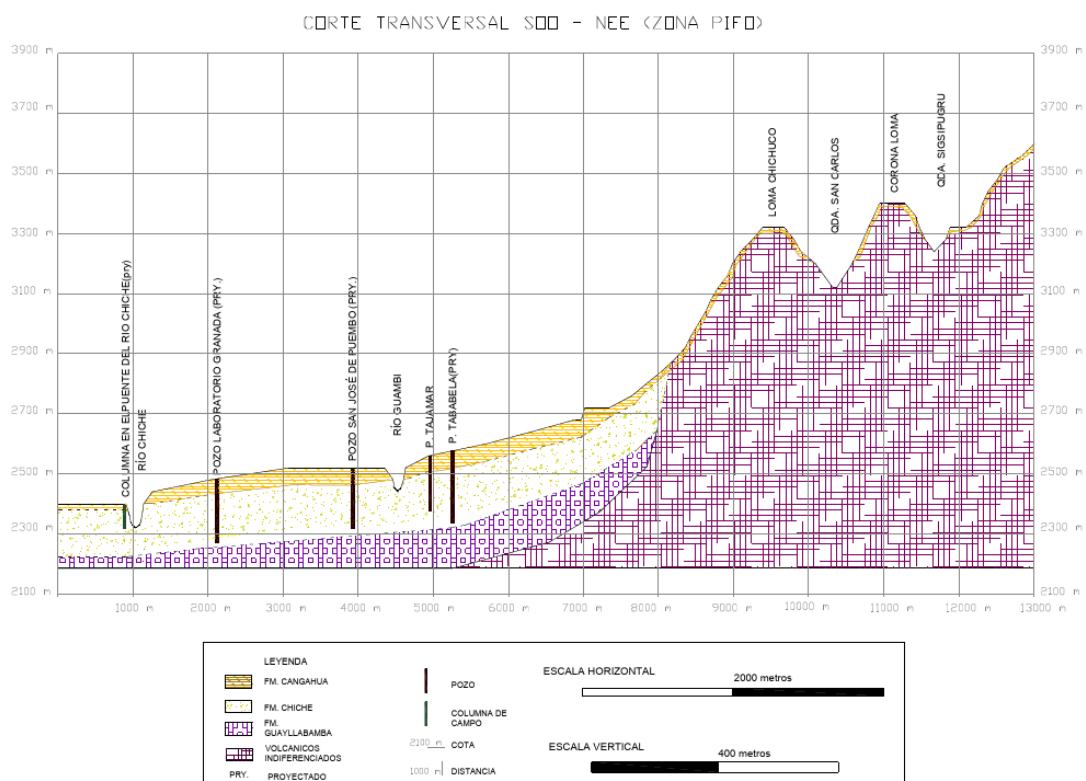
Fuente. Google Maps

2.4.2.2. Características de la Zona

Las formaciones geológicas predominantes en esta zona son similares a las encontradas en el valle interandino, como formación Chiche. Formación Cangahua y Formación

Guayllabamba. Siendo la formación Chiche la más predominante en la región media superficial (Delgado, 2008).

Figura 5. Formaciones principales de la zona de Pifo



Fuente: (Delgado, 2008, pág. 40)

Este corte transversal se ubica a la altura de la parroquia de Pifo, y va desde el Río Chiche hasta el cerro Urcu. Es evidente la mayor presencia de la formación Chiche respecto de la formación Cangahua, esto nos ayudará a reconocer que materiales pueden estar presentes en la Zona (Delgado, 2008).

2.4.2.3. Formación Chiche

El nombre viene por su cercanía al río chiche y está formada por depósitos Fluvio-lacustres interstratificado con depósitos volcánicos. La zona más profunda de esta formación se conforma por depósitos Fluvio-lacustres (Fluvio-lacustres I), ubicadas sobre una superficie muy irregular, esta se encuentra cubierta por depósitos laháricos (Mb Lahar), y, por último,

nuevamente se encuentra cubierta por depósitos Fluvio-lacustres (Mb Fluvio-lacustre II y Mb Chiche) (Delgado, 2008, pág. 30).

2.4.2.4. Miembro Chiche

Su extensión comprende desde el puente del río Chiche hasta los cauces de los ríos Gambi y Urvia. Y tiene un espesor en la zona Pifo de aproximadamente 100 metros, y en la zona norte de la depresión Guayllabamba es mejor que los 10 metros de espesor. En la zona sur de Pifo este miembro de formación contiene capas de conglomerado volcánico, fluvial en el norte, y entre ellas se encuentran arenas tobas y flujos piroclásticos (Delgado, 2008, pág. 34).

2.5. Cemento

Los cementos portland y los cementos mezclados son cementos hidráulicos cuya composición principal son los silicatos hidráulicos de calcio que se obtienen por la pulverización de clínker, también durante este proceso se obtienen otros componentes como el aluminato de calcio, ferroaluminatos de calcio y una o más formaciones de sulfato de calcio también conocido como yeso. Durante la pulverización del clínker se pueden añadir productos naturales o artificiales para crear cementos adicionados y otros cementos hidráulicos (Kosmatka et al., 2004).

2.5.1. Tipos de cemento Hidráulico (ASTM C 1157)

Existen 6 cementos hidráulicos presentados por la ASTM C 1157:

Tipo GU	Uso General
Tipo HE	Alta resistencia inicial
Tipo MS	Moderada resistencia a los sulfatos
Tipo HS	Alta resistencia a los sulfatos
Tipo MH	Moderado calor de hidratación
Tipo LH	Bajo calor de hidratación

A esta gama de Cementos de los pueden tener la opción R cuyas especificaciones ayudan al control de la reactividad álcali-agregado, se tiene por ejemplo GU-R, HE-R, etc.

2.5.1.1. Tipo GU

El Cemento tipo GU, es un cemento de uso general, adecuado para todas las estructuras que no requieran propiedades especiales proporcionadas por otro tipo de cemento. Se usa para la construcción de pavimentos de autopista, puentes, pisos, edificios, etc.

2.5.1.2. Tipo HE

El cemento tipo HE proporciona al hormigón una alta resistencia a edades tempranas, usado de forma similar que el cemento portland tipo III (Kosmatka et al., 2004).

2.5.1.3. Tipo MS

Este tipo de cemento se usa en estructuras que requieran la prevención contra el ataque moderado de sulfatos, principalmente en drenajes, donde las concentraciones de sulfatos son mayores de lo normal. Similar al cemento portland tipo II, para su diseño se requiere una baja relación agua cemento para que su resistencia a los sulfatos sea óptima (Kosmatka et al., 2004).

2.5.1.4. Tipo HS

El cemento tipo HS es usado para prevenir el ataque severo de sulfatos en estructuras que van a ser expuestas a suelos a aguas subterráneas con alta concentración de sulfatos. Usado de forma similar que el cemento portland tipo V (Kosmatka et al., 2004).

2.5.1.5. Tipo MH

El cemento tipo MH se usa para moderar el calor de hidratación y para disminuir los ligeros aumentos de temperatura generada durante el proceso de fraguado del hormigón, y se usa de la misma forma que el cemento portland tipo II (Kosmatka et al., 2004).

2.5.1.6. Tipo LH

El cemento tipo LH se usa para minimizar el calor generado durante la hidratación, desarrollando resistencias lentas con respecto a otros cementos. Generalmente se usa en estructuras de hormigón masivo donde se generan aumentos de temperatura elevados durante

el proceso de fraguado, y se usa de la misma forma que el cemento portland tipo IV (Kosmatka et al., 2004).

2.5.2. Propiedades del Cemento

Al ser el cemento un material fundamental para la elaboración del hormigón debe cumplir con los requisitos mínimos de desempeño para obtener mezclas de concreto satisfactorias de alto estándar. El uso de un cemento de mala calidad genera una mala funcionalidad de la estructura representando así un gran riesgo para los ocupantes. Para asegurar un desempeño óptimo del cemento se deben evaluar sus propiedades físicas, químicas y mecánicas, las cuales se detallan a continuación.

2.5.2.1. Gravedad específica

La gravedad específica del cemento se define como la relación entre la densidad del cemento, sobre la densidad del agua a temperatura ambiente, sin tomar en cuenta las partículas de aire presente, su principal utilidad está relacionada con el diseño y control de mezclas de hormigón. Cuando este valor no se necesita calcular con exactitud, se estima un valor de 3.15. sin embargo, para obras de gran importancia, este valor se calcula de acuerdo con la norma ASTM C 188 (Kosmatka et al., 2004).

2.5.2.2. Finura (Blaine)

La finura Blaine es la relación entre finura de un cemento y la superficie de un gramo del mismo material, y consiste en pasar una cantidad de aire determinada a través de una capa de cemento con una porosidad definida. Esta propiedad se la puede determinar de acuerdo con la norma ASTM C 204.

La importancia de conocer la finura de las partículas molidas del cemento está relacionada con la resistencia inicial, retracción por fraguado, el calor de la hidratación durante el proceso de fraguado, su resistencia a la corrosión congelación y adherencia del hormigón, por otro lado,

las propiedades mecánicas del hormigón como la compresión y la tracción no se ven afectadas (Espinoza & Domenech, 2016).

2.5.2.3. Tiempo de fraguado (Vicat)

El tiempo de fraguado es el período de tiempo desde que el cemento y el agua entran en contacto hasta que por la reacción química de estos elementos la pasta deja de tener fluidez y pierde plasticidad. Los principales factores a tener en cuenta son; temperatura, demanda de agua, tipo de cemento, tipo de mezclado y la adición de aditivos. El análisis de los tiempos de fraguado determina si la pasta está o no reaccionando adecuadamente a la hidratación. Esta propiedad se la puede determinar de acuerdo con la norma ASTM C 1005 (Kosmatka et al., 2004).

2.5.2.4. Expansión (en el Autoclave)

Durante el proceso de endurecimiento la pasta sufre cambios en su volumen. La expansión destructiva retardada consecuente a la excesiva cantidad de cal o magnesia supercalcinadas, puede ser perjudicial para el hormigón, ya que podría generar fisuras, agrietamientos o roturas de la pasta cementante (Kosmatka et al., 2004).

Se ha podido determinar que la presencia de cuarzo en los cementos puzolánicos genera una reacción de expansión excesiva debido a la reactividad álcali-sílice (Espinoza & Domenech, 2016). Esta propiedad se la puede determinar de acuerdo con la norma ASTM C 151.

2.5.2.5. Resistencia a la compresión de morteros

La resistencia a la compresión del cemento se obtiene mediante el ensayo de compresión de cubos o cilindros de mortero dictados por la norma ASTM C 109, el tipo de cemento, su finura y los compuestos del cemento influirán en su resistencia a la compresión, si bien la resistencia del cemento cumple con las especificaciones de compresión solicitadas por norma, su resultado no puede ser tomado como pronóstico para la resistencia del hormigón, ya que su proceso de elaboración, componentes y proceso de mezclado no son los mismos (Kosmatka et al., 2004).

3. Metodología de la Investigación

Con el fin de evaluar el efecto producido por la adición de polvo de neumático reciclado al hormigón, en la presente investigación se elaboraron muestras de hormigón sin ningún tipo de alteración, para posteriormente ser comparada con muestras alteradas con polvo de neumático reciclado. Para que esta comparación presente una alta confiabilidad es necesario que los componentes usados para la elaboración de las muestras cumplan con los requisitos de calidad normalizados por la INEN y la ASTM.

Los agregados pétreos utilizados corresponden a la mina de HOLCIM ubicada en Pifo, que cumplen con las normativas ASTM C 33 e INEN 872. El cemento portland hidráulico utilizado es tipo GU fabricado por HOLCIM que cumple con los estándares de las normativas ASTM C 595 e INEN 2380.

El polvo de neumático reciclado fue proporcionado por la empresa Rubberaction Cia. Ltda., y sus características fueron determinadas de acuerdo con lo especificado por la INEN 2680

Las resistencias de diseño consideradas para la investigación fueron $f'c = 210 \text{ kg/cm}^2$ y $f'c = 240 \text{ kg/cm}^2$, a continuación, se reemplazó el polvo de neumático reciclado por 4 porcentajes de volumen de agregado fino (5%,15%,25% y 35%), teniendo un total de 10 dosificaciones. Por cada dosificación realizada se tomaron 13 muestras, 10 cilindros y 3 viguetas, para un total de 100 cilindros y 30 viguetas. Los ensayos para los cilindros fueron realizados a las edades de 7 y 28 días, y las viguetas fueron ensayadas a los 28 días. Por cada dosificación se ensayaron 5 cilindros para compresión simple a los 7 días, 5 ensayos para compresión simple de los cuales de elegirán 3 para módulo de elasticidad a los 28 días, y 3 viguetas para flexión a los 28 días.

3.1. Diseño y dosificación de mezclas de Hormigón

El diseño de mezclas es el proceso de determinación de las características requeridas del hormigón. Estas características son las propiedades del hormigón en estado fresco y estado endurecido, por su parte la dosificación de mezclas se refiere a la determinación de las

cantidades de los materiales del hormigón, para lograr las características específicas deseadas. Un concreto con la proporción adecuada de sus componentes presenta las siguientes cualidades;

- Trabajabilidad, la requerida del hormigón en estado fresco
- Durabilidad, resistencia deseada y uniformidad del hormigón en estado endurecido
- Economía

Estas cualidades del hormigón se las puede lograr únicamente con la selección adecuada de los materiales y las características requeridas de la mezcla (Kosmatka, Kerkhoff, Panarese, & Tanesi, 2004).

Antes de seleccionar el método de dosificación adecuado para nuestra mezcla, es necesario escoger sus características en función del uso que se pretenda dar al hormigón, el tipo de exposición, la característica de sus componentes, y las características físico-mecánicas que requiera nuestro hormigón. Una vez considerado estos aspectos, se elige el método que se adecue a nuestras necesidades, para lograr una mezcla óptima.

3.1.1. Dosificación Método ACI 211.1 (Modificado)

El método ACI es uno de los más utilizados debido a su facilidad, utilizado para resistencia no mayores a los 42 MPa a la compresión.

Para la ejecución de este método se requieren los siguientes datos:

3.1.1.1. Tamaño máximo nominal de agregado grueso

La ACI recomienda un tamaño menor o igual a la quinta parte de la separación entre los lados del encofrado, menor o igual a la tercera parte del espesor de la losa, menor o igual a $\frac{3}{4}$ del espaciamiento mínimo libre entre barras o alambres de refuerzo, paquetes de barras, tendones individuales, paquetes de tendones y ductos.

3.1.1.2. Asentamiento

De acuerdo con el tipo de construcción la ACI recomienda el uso de los siguientes valores de asentamiento máximo:

Tabla 3. Revenimientos recomendados para varios Tipos de Construcción

Construcción de Concreto	Revenimiento mm (pulg.)	
	Máximo*	Mínimo
Zapatas y muros de cimentación reforzados	75 (3)	25 (1)
Zapatas, cajones y muros de Subestructuras sin refuerzo	75 (3)	25 (1)
Vigas y muros reforzados	100 (4)	25 (1)
Columnas de edificios	100 (4)	25 (1)
Pavimentos y losas	75 (3)	25 (1)
Concreto Masivo	75(3)	25 (1)

Fuente: ACI 211.1-91 – Tabla 6.3.1; Diseño de mezclas de concreto - IMCYC

3.1.1.3. Agua Neta

En función del tamaño máximo nominal del agregado grueso, si el hormigón presenta o no aire incluido y el asentamiento requerido, la siguiente tabla establece los valores de agua neta y cantidad aproximada de aire atrapado que deberán ser considerados para el diseño.

Tabla 4. Requisitos Aproximados de Agua de Mezcla y contenido de Aire para diferentes Revenimientos o Tamaños Máximos nominales de Agregado

Revenimiento (asentamiento) (mm)	Agua, kilogramos por metro cúbico de concreto, para los tamaños de agregado indicados*							
	9,5 mm	12,5 mm	19 mm	25 mm	37,5 mm	50 mm	75 mm	150 mm
Concreto sin aire incluido								
25 a 50	207	199	190	179	166	154	130	113
75 a 100	228	216	205	193	181	169	145	124
150 a 175	243	228	216	202	190	178	160	
Cantidad aproximada de aire atrapado en un concreto sin aire incluido, porcentaje	3	2,5	2	1,5	1	0,5	0,3	0,2
concreto con aire incluido								
25 a 50	181	175	168	160	150	142	122	107
75 a 100	202	193	184	175	165	157	133	119
150 a 175	216	205	197	184	174	166	154	

Fuente: ACI 211.1-91 – Tabla 6.3.3; Diseño de mezclas de concreto - IMCYC

3.1.1.4. Porcentaje de Seguridad

Antes de definir la relación agua/cemento, se requiere definir la resistencia a compresión que deberá cumplir el hormigón, por lo que se necesitan utilizar factores de seguridad que aumenten la resistencia que haya sido previamente seleccionada por el análisis estructural, esto con el fin de asegurar la resistencia de la mezcla, para que se encuentre por encima de los requerimientos previstos cuando no se tienen datos previos de desviación estándar. En la presente investigación se ha utilizado un porcentaje de seguridad del 4%.

3.1.1.5. Relación Agua/Cemento

Una vez definido el porcentaje de seguridad, procedemos a calcular la resistencia a compresión de diseño a los 28 días con la siguiente expresión:

$$f'c_{diseño} = f'c_{requerido} * \left(1 + \frac{\%seguridad}{100}\right) \quad (3)$$

Calculado el $f'c$ de diseño se define la relación agua/cemento proporcionado por la ACI 211.1. tabla 6.3.3. Sin embargo, estos valores han sido modificados mediante investigaciones, para adaptarlas a las condiciones de cemento y agregados presentes en Ecuador, el Ing. Lara Lauro presenta la siguiente tabla:

Tabla 5. Dependencia entre la Relación Agua-Material Cementante y la Resistencia a Compresión del Concreto

Resistencia a la compresión a los 28 Días, kg/cm ² (Mpa)	Relación agua-material cementante en masa	
	Cemento Portland (ACI 211.1)	Cemento Modificado IP, (Ing. Lara Lauro)
400 (40)	0,43	0,33
350 (35)	0,48	0,38
300 (30)	0,55	0,43
250 (25)	0,62	0,50
200 (20)	0,7	0,58
150 (15)	0,8	0,67

Fuente: ACI 211.1-91 – Tabla 6.3.4 (a); Diseño de mezclas de concreto – IMCYC

3.1.1.6. Cantidad de Cemento

Una vez definida el agua neta y la relación agua cemento, la cantidad de cemento se calcula con la siguiente expresión:

$$\text{Cemento} = \frac{\text{Agua neta}}{\text{Relación a/c}} \quad (4)$$

3.1.1.7. Cálculo de los agregados en estado superficie saturada seca (S. S. S.)

Una vez definidas las propiedades de los agregados pétreos como la gravedad específica, absorción, humedad natural y la gravedad específica del cemento, se puede calcular el peso unitario del hormigón utilizando la siguiente expresión:

$$UM = 10Ga(100 - A) + Cm \left(1 - \frac{Ga}{Gc}\right) - Wm(Ga - 1) \quad (5)$$

Donde:

$Ga =$ Gravedad específica SSS promedio del agregado fino y grueso

$Gc =$ Gravedad específica del cemento

$A =$ % de Aire contenido

$Wm =$ Agua neta $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

$Cm =$ Cemento requerido $\left(\frac{kg}{m^3}\right)$

Habiendo definido el peso unitario del hormigón se puede calcular el peso unitario de los agregados en estado S.S.S. con la siguiente formula:

$$\text{Agregados (SSS)} = Um - \text{Agua neta} - \text{Cemento} \quad (6)$$

A continuación, se establece el porcentaje de agregado fino y grueso que se ha calculado en función de los módulos de finura con las expresiones (1) y (2), evidenciando que la cantidad de pasta sea la adecuada para evitar la segregación y el escurrimiento. Los porcentajes de agregado fino nos ayudarán a calcular la cantidad de arena y ripio en superficie saturada seca como se indica a continuación:

$$\text{Arena (SSS)} = \frac{\% \text{ de agregado fino}}{100} * \text{Agregados(sss)} \quad (7)$$

$$\text{Ripio (SSS)} = \frac{\% \text{ de agregado Grueso}}{100} * \text{Agregados(sss)} \quad (8)$$

3.1.1.8. Agregados en estado natural

Una vez obtenida la cantidad de materiales en S.S.S. se calcula la cantidad de materiales en estado natural, es decir, en el estado de humedad en el que se encuentra al momento de dosificar, esta cantidad se obtiene con la siguiente expresión:

$$Masa\ seca\ Ripio = \frac{Ripio\ (SSS)}{1 + \frac{\%absorción\ Ripio}{100}} \quad (9)$$

$$Masa\ seca\ Arena = \frac{Arena\ (SSS)}{1 + \frac{\%absorción\ Arena}{100}} \quad (10)$$

$$Ripio\ Nat = Masa\ seca\ Ripio * \left(1 + \frac{\%humedad\ Ripio}{100}\right) \quad (11)$$

$$Arena\ Nat = Masa\ seca\ Arena * \left(1 + \frac{\%humedad\ Arena}{100}\right) \quad (12)$$

3.1.1.9. Agua de Mezcla

Con los valores de agua natural, arena y ripio seco, se calcula el agua de la mezcla.

$$Ag.\ mezcla = Ag.\ net + \frac{Arena(s)(\%abs - \%hum)}{100} + \frac{Ripio(s)(\%abs - \%hum)}{100} \quad (13)$$

Donde:

$$Ag.\ Mezcla = Agua\ de\ mezcla$$

$$Ag.\ net = Agua\ neta$$

$$Arena\ (s) = Masa\ seca\ de\ arena$$

$$Ripio\ (s) = Masa\ seca\ de\ ripio$$

$$\%abs = Absorción$$

$$\%hum = Humedad\ natural$$

3.1.1.10. Dosificación y restimación

Las dosificaciones fueron trabajadas para un hormigón de uso común, con un asentamiento de 7,5 a 10 centímetros, sin embargo, se estableció un asentamiento específico de 8 +/- 1 cm. Una vez realizada la primera mezcla es necesario comprobar que el asentamiento unitario de la mezcla de hormigón cumpla con lo establecido en el diseño, caso contrario se deberá hacer las correcciones correspondientes a estos 2 parámetros, la corrección se la debe realizar cuantas veces sean necesarias hasta alcanzar los valores esperados.

Para encontrar el factor de corrección para el peso específico se debe hacer una relación entre el peso unitario esperado sobre el peso unitario obtenido. Mientras que para realizar la corrección por asentamiento se establece que por cada 2 kg de agua aumenta o disminuye un centímetro su asentamiento en un metro cúbico de hormigón, para esta relación se tiene la siguiente expresión:

$$Ag. neta corregida = \frac{Agua neta}{F. corrección} + 2 - (Asent. requerido - Asent. obtenido) \quad (14)$$

Donde:

F. corrección = Factor de corrección del peso unitario

Asent. = Asentamiento

3.1.1.11. Dosificación de muestras patrón $f'c$ esperado = 210 kg/cm² y $f'c$ esperado = 240 kg/cm² tabla de cantidades

Tabla 6. Dosificación $f'c$ esperado = 210 kg/cm² ($a/c = 0,542$)

Dosificación muestras patrón ($a/c = 0,542$)	
Agua	270 kg/m ³
Cemento	400 kg/m ³
Arena	831 kg/m ³
Ripio	799 kg/m ³

Fuente: Propia

Tabla 7. Propiedades del hormigón (estado fresco) ($a/c = 0,542$)

Peso unitario	2256 kg/m ³
Asentamiento	9 cm
Contenido de aire	1,9 %

Fuente: Propia

Tabla 8. Dosificación $f'c$ esperado = 240 kg/cm² ($a/c = 0,493$)

Dosificación muestras patrón ($a/c = 0,493$)	
Agua	259 kg/m ³
Cemento	436 kg/ m ³
Arena	820 kg/ m ³
Ripio	754 kg/ m ³

Fuente: Propia

Tabla 9. Propiedades del hormigón (estado fresco) ($a/c = 0,493$)

Peso unitario	2269 kg/m ³
Asentamiento	9 cm
Contenido de aire	1,9 %

Fuente: Propia

3.1.2. Dosificación del hormigón con polvo de neumático reciclado

Para el diseño de mezclas de hormigón con polvo de neumático reciclado, se requirió previamente determinar la gravedad específica de este material. De acuerdo con la investigación realizada en la Escuela Politécnica Nacional “Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores” se determinó que la gravedad específica del PNR, calculada por el método hidrostático es de 1,17 (Campaña, Galeas, & Guerrero, 2015).

Durante el análisis realizado al dosificar las muestras de prueba con el polvo de neumático, se determinó una pérdida de trabajabilidad cuando su incidencia dentro de la mezcla era mayor, por lo que se relacionó este efecto a la presencia de absorción del material, debido a las dificultades para determinar este parámetro, se procedió al cálculo de su absorción como establece la norma ASTM C 127.

Una vez establecidos estos parámetros de absorción y gravedad específica del polvo de neumático reciclado, y partiendo del resumen de las dosificaciones de las muestras patrón, se realiza el siguiente procedimiento para reemplazar el agregado fino por polvo de neumático reciclado partiendo de sus volúmenes absolutos:

3.1.2.1. Porcentajes de reemplazo

Para la presente investigación se establecieron porcentajes de reemplazo del 5, 15, 25 35 % del volumen absoluto del agregado fino.

3.1.2.2. Volumen Absoluto del Polvo de neumático reciclado y Arena

Una vez establecido el porcentaje de reemplazo del PNR procedemos a calcular su volumen de reemplazo en función del volumen absoluto del agregado fino que se va a reemplazar mediante la siguiente expresión:

$$V_{abs\ Arena} = \frac{Arena\ seca}{Ga(arena)} \quad (15)$$

$$V_{abs\ PNR} = V_{abs\ Arena} * \frac{\%remp}{100} \quad (16)$$

Donde:

$Ga(arena)$ = Gravedad específica de la arena

$\%remp$ = Porcentaje de reemplazo del agregado fino

$V_{abs\ PNR}$ = Volumen absoluto del polvo de neumático reciclado

$V_{abs\ arena}$ = Volumen absoluto de arena

3.1.2.3. Masa seca del PNR y arena

Para determinar la cantidad de arena hay que tomar en cuenta la reducción de volumen por el reemplazo de PNR, y sus cantidades serán calculadas por el producto entre sus volúmenes absolutos y su gravedad específica como se muestra a continuación:

$$PNR = V_{abs\ PNR} * Ga(caucho) \quad (17)$$

$$Arena\ seca = (V_{abs\ Arena} - V_{abs\ PNR}) * Ga(arena) \quad (18)$$

3.1.2.4. Arena Natural

La nueva cantidad de arena se calculará con los datos previamente establecidos de humedad natural del agregado fino:

$$Arena = Arena\ seca * \left(1 + \left(\% \frac{humArena}{100} \right) \right) \quad (19)$$

3.1.2.5. Agua de mezcla

Una vez establecido los nuevos datos para la cantidad de arena, el agua de la mezcla se ve afectada, y su variación debe ser recalculada con la siguiente expresión:

$$Ag.\ mezcla = Ag.net + \frac{Arena(s)(\%abs - \%hum)}{100} + \frac{Ripio(s)(\%abs - \%hum)}{100} \quad (20)$$

3.1.2.6. Dosificación de muestras alteradas con PNR tabla de cantidades

Tabla 10. Dosificación para una relación $a/c=0,542$ con 5% de PNR

Dosificación para una relación ($a/c = 0,542$) con 5% PNR	
Agua	262 kg/m ³
Cemento	384 kg/m ³
Arena	793 kg/m ³
Ripio	775 kg/m ³
PNR	18 kg/m ³

Fuente: Propia

Tabla 11. Propiedades del hormigón (Estado fresco) con 5% de PNR ($a/c = 0,542$)

Peso unitario	2177 kg/m ³
Asentamiento	14.3 cm
Contenido de aire	1,8 %

Fuente: Propia

Tabla 12. Dosificación para una relación $a/c=0,542$ con 15% de PNR

Dosificación para una relación ($a/c = 0,542$) con 15% PNR	
Agua	262 kg/m ³
Cemento	384 kg/m ³
Arena	709 kg/m ³
Ripio	775 kg/m ³
PNR	55 kg/m ³

Fuente: Propia

Tabla 13. Propiedades del hormigón (Estado fresco) con 15% de PNR ($a/c=0,542$)

Peso unitario	2133 kg/m ³
Asentamiento	12 cm
Contenido de aire	1,7 %

Fuente: Propia

Tabla 14. Dosificación para una relación $a/c=0,542$ con 25% de PNR

Dosificación para una relación ($a/c = 0,542$) con 25% PNR	
Agua	265 kg/m ³
Cemento	384 kg/m ³
Arena	622 kg/m ³
Ripio	775 kg/m ³
PNR	92 kg/m ³

Fuente: Propia

Tabla 15. Propiedades del hormigón (Estado fresco) con 25% de PNR ($a/c=0,542$)

Peso unitario	2023 kg/m ³
Asentamiento	8.5 cm
Contenido de aire	2 %

Fuente: Propia

Tabla 16. Dosificación para una relación $a/c=0,542$ con 35% de PNR

Dosificación para una relación ($a/c = 0,542$) con 35% PNR	
Agua	265 kg/m ³
Cemento	384 kg/m ³
Arena	539 kg/m ³
Ripio	775 kg/m ³
PNR	129 kg/m ³

Fuente: Propia

Tabla 17. Propiedades del hormigón (Estado fresco) con 35% de PNR ($a/c=0,542$)

Peso unitario	1979 kg/m ³
Asentamiento	5.5 cm
Contenido de aire	1,8 %

Fuente: Propia

Tabla 18. Dosificación para una relación $a/c=0,493$ con 5% de PNR

Dosificación para una relación ($a/c = 0,493$) con 5% PNR	
Agua	263 kg/m ³
Cemento	427 kg/m ³
Arena	775 kg/m ³
Ripio	758 kg/m ³
PNR	18 kg/m ³

Fuente: Propia

Tabla 19. Propiedades del hormigón (Estado fresco) con 5% de PNR ($a/c=0,493$)

Peso unitario	2180 kg/m ³
Asentamiento	14 cm
Contenido de aire	1,8 %

Fuente: Propia

Tabla 20. Dosificación para una relación $a/c=0,493$ con 15% de PNR

Dosificación para una relación ($a/c = 0,493$) con 15% PNR	
Agua	263 kg/m ³
Cemento	427 kg/m ³
Arena	693 kg/m ³
Ripio	758 kg/m ³
PNR	54 kg/m ³

Fuente: Propia

Tabla 21. Propiedades del hormigón (Estado fresco) 15% de PNR ($a/c=0,493$)

Peso unitario	2138 kg/m ³
Asentamiento	10 cm
Contenido de aire	1,7 %

Fuente: Propia

Tabla 22. Dosificación para una relación $a/c=0,493$ con 25% de PNR

Dosificación para una relación ($a/c = 0,493$) con 25% PNR	
Agua	263 kg/m ³
Cemento	427 kg/m ³
Arena	612 kg/m ³
Ripio	758 kg/m ³
PNR	90 kg/m ³

Fuente: Propia

Tabla 23. Propiedades del hormigón (Estado fresco) con 25% de PNR ($a/c=0,493$)

Peso unitario	2035 kg/m ³
Asentamiento	8.1 cm
Contenido de aire	1,9 %

Fuente: Propia

Tabla 24. Dosificación para una relación $a/c=0,493$ con 35% de PNR

Dosificación para una relación ($a/c = 0,493$) con 35% PNR	
Agua	262 kg/m ³
Cemento	427 kg/m ³
Arena	530 kg/m ³
Ripio	758 kg/m ³
PNR	126 kg/m ³

Fuente: Propia

Tabla 25. Propiedades del hormigón (Estado fresco) con 35% de PNR ($a/c=0,493$)

Peso unitario	1997 kg/m ³
Asentamiento	5.8 cm
Contenido de aire	1,8 %

Fuente: Propia

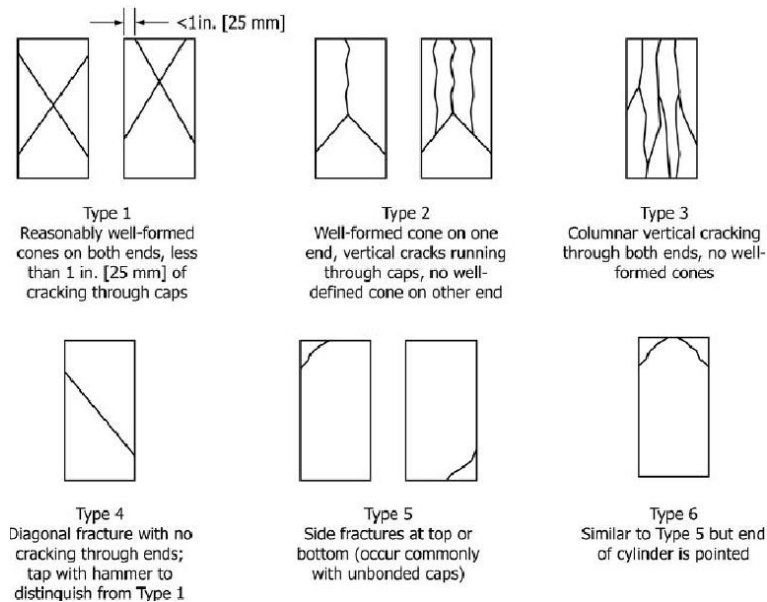
3.1.3. Propiedades mecánicas del hormigón endurecido

3.1.3.1. Resistencia a la compresión

Una de las propiedades mecánicas más importantes es la resistencia a la compresión del hormigón endurecido, ya que las estructuras principalmente se diseñan para desarrollar resistencia a esfuerzos de compresión. Este ensayo se lo realiza a muestras cilíndricas de hormigón con una relación diámetro/altura de $\frac{1}{2}$ y consiste en someter la muestra de hormigón sin confinamiento a esfuerzos axiales de compresión en el rango de 0.14 a 0.34 MPa/segundo hasta llegar a su estado de falla. El ensayo de compresión se realiza según lo establecido en la norma ASTM C 39.

El tamaño de la muestra de hormigón a ensayarse dependerá del tamaño máximo nominal del agregado grueso, pues este no deberá ser mayor a 1/3 del diámetro del cilindro u molde, para esta investigación se utilizaron cilindros de 150 mm de diámetro y 300 mm de altura.

Figura 6. Tipos de Falla en ensayo de compresión simple



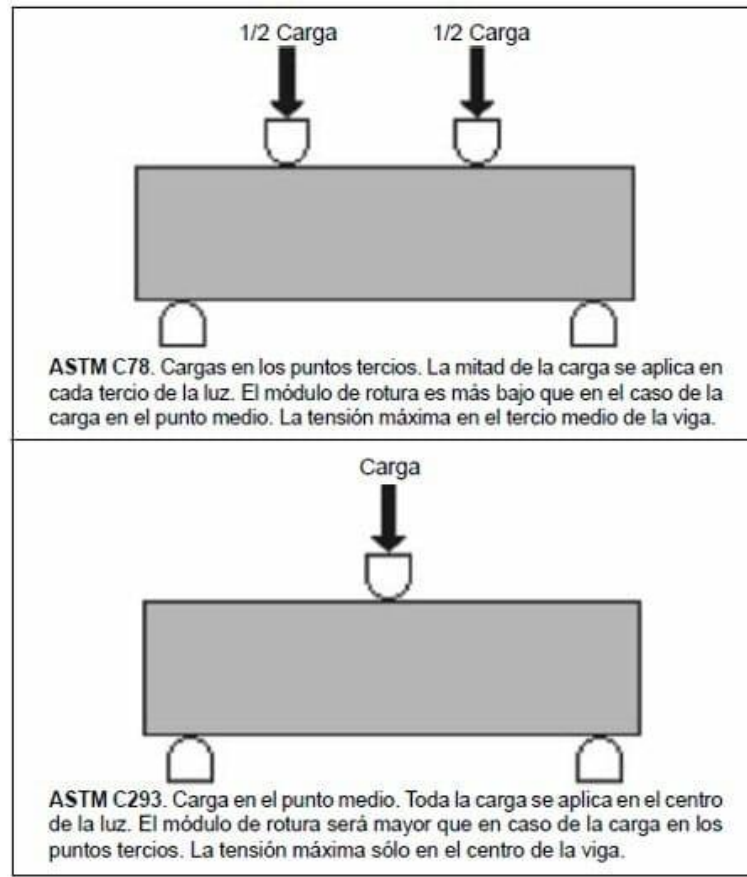
Fuente: Norma ASTM C 39

3.1.3.2. Tracción por flexión de viguetas

La Resistencia a flexión también es una medida de resistencia a la tracción del concreto, la cual consiste en aplicar un esfuerzo a una viga de hormigón no reforzado hasta que su resistencia llegue a la falla de la muestra, y su resultado se expresa como módulo de rotura en MPa, este parámetro se lo obtiene por la norma ASTM C 78.

El espécimen de concreto es colocado de tal manera que la cara expuesta en el molde de la vigueta no tenga contacto con los dispositivos de carga. Se centra las marcas donde será aplicada las cargas en los puntos tercios de la luz libre del espécimen. De manera gradual se aplicará una carga hasta llegar a su falla, se registra la carga máxima y las dimensiones del espécimen. El módulo de rotura se encontrará entre el 10% y 20% de la resistencia obtenida en el ensayo a compresión.

Figura 7. Longitudes de aplicación de carga en el ensayo según la metodología indicada



Fuente: Concreto, I.E. (2009). Inecy.otg.ec

El módulo de roturo se obtiene con la siguiente expresión:

$$MR = \frac{P * L}{b * d^2} \quad (21)$$

Donde:

$P =$ Carga aplicada (KN)

$L =$ luz libre (mm)

$b =$ Promedio del ancho (mm)

$d =$ Promedio de la altura (mm)

3.1.3.3. Módulo de elasticidad

En general todos los materiales tienen un comportamiento elástico, este comportamiento ocurre cuando se genera un esfuerzo de tal magnitud que supera las fuerzas internas cohesivas y de adherencia, en consecuencia, el material se fisura y finalmente falla.

La elasticidad es una propiedad mecánica en la cual el material sufre una deformación reversible por acción de una fuerza exterior.

El módulo de elasticidad del hormigón es una representación de su rigidez y es una relación entre el esfuerzo y su deformación unitaria. Este valor influye en las deflexiones, derivas y rigidez de una estructura o elemento estructural, conocer el módulo de elasticidad también nos ayuda al análisis del acortamiento por carga axial de un elemento estructural (Osorio, 2011).

La determinación del módulo de elasticidad fue calculada y ensayada de acuerdo con la norma ASTM C 469. Los valores de módulo de elasticidad serán tomados dentro del rango de esfuerzos de 0 a 40% de la última resistencia de la muestra de hormigón. (American Concrete Institute, 1995)

La norma ASTM C 469-94 establece la siguiente fórmula para el cálculo del módulo de elasticidad:

$$E = \frac{\sigma_2 - \sigma_1}{\varepsilon_2 - 0.000050} \quad (22)$$

Donde:

$E =$ Módulo de elasticidad secante

$\sigma_1 =$ Esfuerzo correspondiente a la deformación longitudinal de 50 millonésima

$\sigma_2 =$ Esfuerzo correspondiente al 40% de la carga última

$\varepsilon_2 =$ Deformación longitudinal producida por el esfuerzo σ_2

Según la ACI plantea la siguiente ecuación para módulo de elasticidad:

$$E_{aci} = 4270 * W^{1.5} * \sqrt{f'c} \quad \left(\frac{kg}{cm^2} \right) \quad (23)$$

Donde:

$E_{aci} =$ Módulo de elasticidad

$W^{1.5} =$ Peso específico del hormigón

$f'c =$ Esfuerzo máximo de compresión

Los valores α y λ que se muestran a continuación nos ayudan a comparar los valores de módulos de elasticidad de la ACI.

$$\alpha_{ACI} = 4270 * w^{1.5} \quad (24)$$

Y donde α es igual a:

$$\alpha_{calculado} = \frac{Ec}{\sqrt{f'c}} \quad (25)$$

3.1.4. Resistencia del hormigón

Para asegurar la confiabilidad de los resultados que se obtendrán luego de ensayar nuestras muestras de hormigón, se determinan sus valores de resistencia promedio y resistencia característica.

La resistencia característica del hormigón $f'cr$ (también llamada resistencia de diseño estructural) es un valor que se adopta para la resistencia a compresión y tracción en los cálculos del proyecto, que va asociada a un nivel de confiabilidad del 95%, esto quiere decir que solo el 5% del total de muestras ensayadas podrán tener resistencias más bajas que su resistencia característica.

Para el cálculo de la resistencia característica de utilizará la siguiente expresión:

$$f'cr = f'cp - 1,35s \quad (26)$$

Donde:

$$f'cr = \text{resistencia característica del hormigón} \left(\frac{kg}{cm_2} \right)$$

$$f'cp = \text{resistencia promedio del hormigón} \left(\frac{kg}{cm_2} \right)$$

$$S = \text{desviación estándar} \left(\frac{kg}{cm_2} \right)$$

4. Cálculos y Resultados

4.1. Propiedades de los agregados pétreos

4.1.1. Granulometría (ASTM C 136)

Tabla 26. Granulometría agregado fino (arena triturada no lavada)

Tamiz	abertura (mm)	Masa Retenida Parcial (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido acumulado	Porcentaje que pasa	% Pasa (ASTM C 33)	
						Mínimo	Máximo
4	4,76	3,20	0,29	0,29	99,71	95	100
8	2,36	327,40	30,11	30,41	69,59	80	100
16	1,19	282,60	25,99	56,40	43,60	50	85
30	0,595	160,00	14,72	71,11	28,89	25	60
50	0,297	117,90	10,84	81,96	18,04	5	30
100	0,142	64,00	5,89	87,84	12,16	0	10
Base		132,20	12,16	100,00			
Total		1087,30					
					MF	3,2	

Fuente: Propia

Gráfica 1. Gráfica Granulométrica del agregado fino (Arena triturada no lavada)

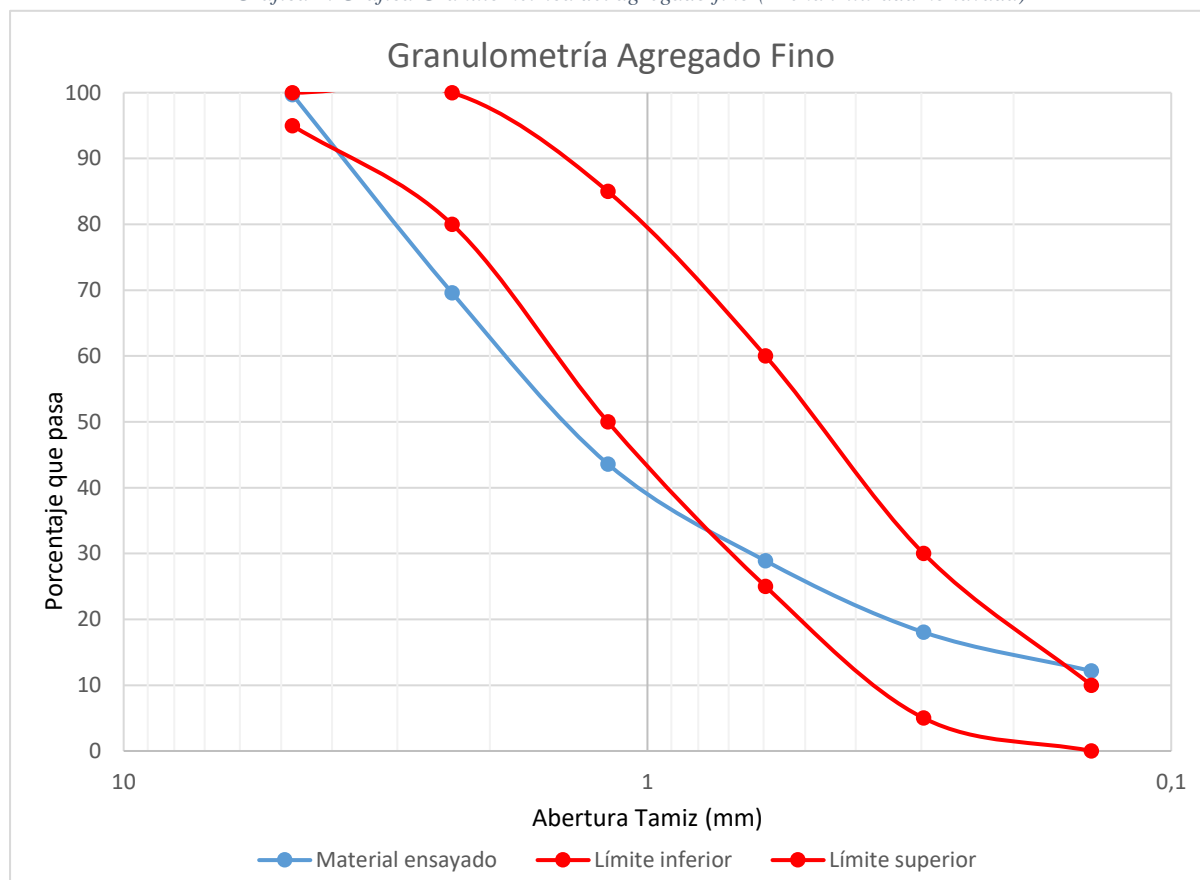
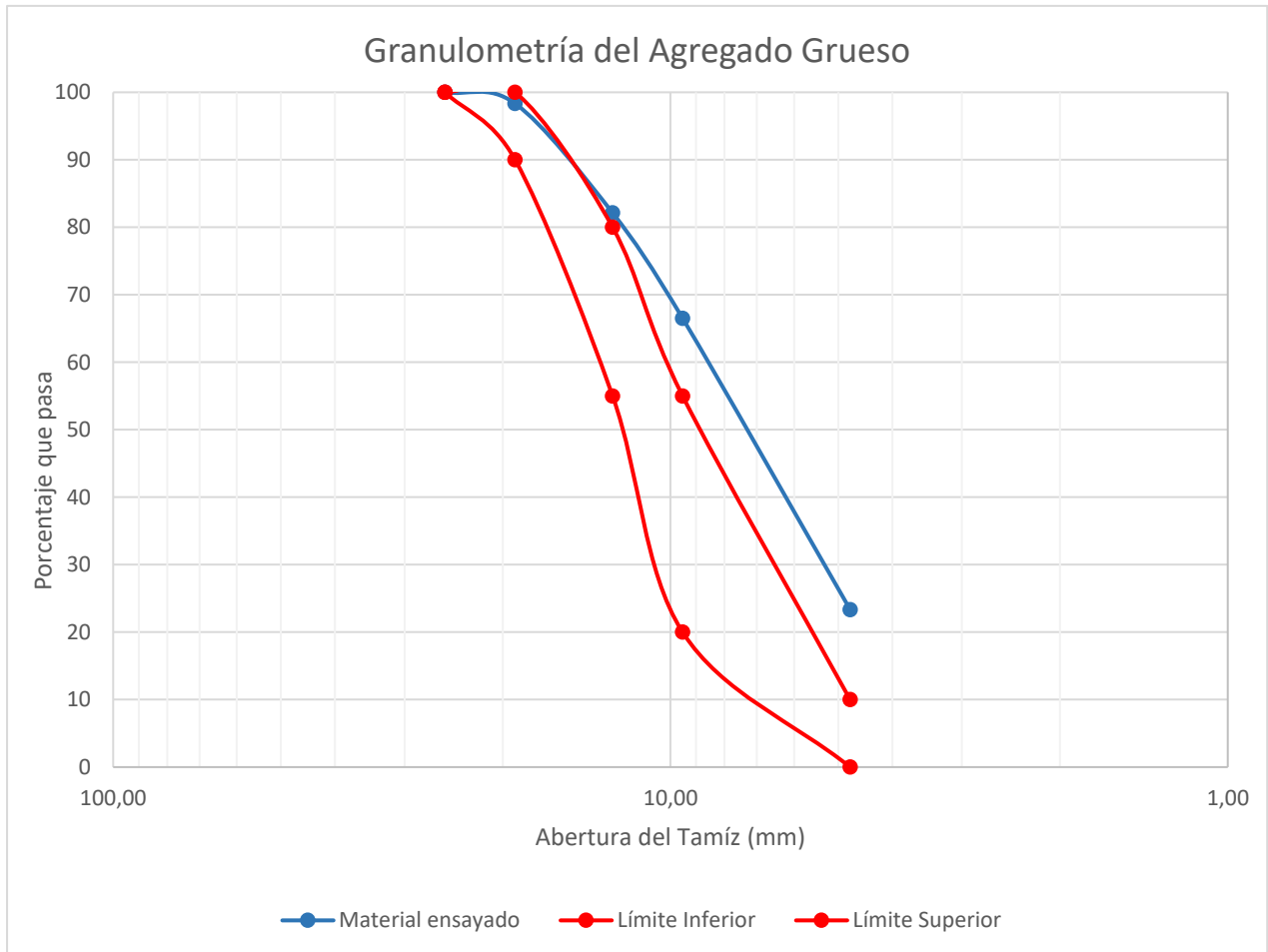


Tabla 27. Granulometría del agregado grueso (Piedra # 67)

Tamiz N°	abertura (mm)	Masa Retenida Parcial (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido acumulado	Porcentaje que pasa	% Pasa (ASTM C 33)	
						Mínimo	Máximo
1	25,40	0,00	0,00	0,00	100,00	100,00	100,00
3/4"	19,00	85,10	1,66	1,66	98,34	90,00	100,00
1/2"	12,70	829,30	16,20	17,87	82,13	55,00	80,00
3/8"	9,51	799,70	15,63	33,49	66,51	20,00	55,00
4,00	4,76	2208,70	43,16	76,65	23,35	0,00	10,00
Base		1195,00	23,35	100,00			
Total		5117,80					
					MF	6,12	

Fuente: Propia

Gráfica 2. Gráfica Granulométrica del Agregado Grueso (Piedra # 67)



4.1.2. Material fino que pasa el tamiz N° 200 (ASTM C 117)

Tabla 28. Material Fino que pasa el tamiz # 200

Descripción	Unidad	Valor
Masa inicial de la muestra	gr	500
Masa de material retenida en el tamiz #200	gr	442
Porcentaje de material que pasa el tamiz #200	%	11,6
Límite máximo según ASTM C 33	%	7

Fuente: Propia

4.1.3. Gravedad Específica y absorción de los agregados (ASTM C 127 / C 128)

Tabla 29. Gravedad Específica y absorción Agregado fino (arena triturada no lavada)

Descripción	Unidad	Valor
Masa de la muestra seca	gr	471,1
Masa del matraz con agua hasta 500 cc	gr	646,8
Masa de la muestra + matraz + agua	gr	944,4
Masa de la muestra saturada con superficie seca	gr	500
Masa del Matraz	gr	148,8
Gravedad Especifica Bulk		2,32
Gravedad Específica Del Material S.S.S.		2,47
Gravedad Específica Aparente		2,71
Absorción	%	6

Fuente: Propia

Tabla 30. Gravedad Específica y absorción del Agregado grueso (Piedra # 67)

Descripción	Unidad	Valor
Masa de la muestra seca	gr	3745
Masa de la muestra saturada con superficie seca	gr	3855
Masa de la muestra sumergida en agua	gr	2358
Gravedad Específica Bulk		2,50
Gravedad específica Del material S.S.S.		2,57
Gravedad Específica Aparente		2,70
Absorción	%	2,94

Fuente: Propia

4.1.4. Peso Unitario y porcentaje de Vacíos (ASTM C 29)

Tabla 31. Peso unitario y porcentaje de vacíos del Agregado Fino

Descripción	Unidad	
Masa del Material Compactado	kg	4,972
Masa del recipiente más el material compactado	kg	6,63
Masa del recipiente	kg	1,658
Volumen del recipiente	m ³	0,002735
Masa del molde más material suelto	kg	5,97
Peso unitario compactado	kg/m ³	1817,91
Peso unitario suelto	kg/m ³	1576,60
Porcentaje de Vacíos	%	29,76

Fuente: Propia

Tabla 32. Peso unitario y porcentaje de vacíos del Agregado Grueso

Descripción	Unidad	
Masa del Material Compactado	kg	10,13
Masa del recipiente más el material compactado	kg	13,95
Masa del recipiente	kg	3,81
Volumen del recipiente	m ³	0,0069
Masa del molde más Material Suelto	kg	13,18
Masa del material suelto	kg	9,37
Peso unitario compactado	kg/m ³	1472,96
Peso unitario suelto	kg/m ³	1361,73
Porcentaje de vacíos	%	42,80

Fuente: Propia

4.1.5. Equivalente de Arena (ASTM D 2419)

Tabla 33. Equivalente de arena

Masa de la muestra (gr)	500	500
Lectura A	4,2	4,3
Lectura B	3,5	3,6
Equivalente de arena	83,3	83,7
Promedio		83,5

Fuente: Propia

4.1.6. Contenido orgánico (ASTM C 40)

Tabla 34. Contenido orgánico de los agregados

Número en la Escala	INEN 855 (≤ 3)
≤ 1	Cumple

Fuente: Propia

4.1.7. Terrones de Arcilla (ASTM C 142)

Tabla 35. Terrones de Arcilla de los agregados pétreos

Agregado	% de Terrones de Arcilla	Límite Máximo (ASTM C 33)
Fino	0,42	3%
Grueso	0,11	2%

Fuente: Propia

4.1.8. Abrasión (ASTM C 131)

Tabla 36. Abrasión del Agregado grueso

Descripción	Unidad	
Material que pasa el Tamiz # 12	gr	1405
Masa inicial de la muestra	gr	4970
Masa sostenida en el tamiz #12	gr	3565
Porcentaje de Desgaste	%	28,27
Máximo Valor ASTM C 33	%	50

Fuente: Propia

4.1.9. Desgaste de los agregados pétreos a los Sulfatos (ASTM C 88)

Tabla 37. Desgaste del agregado grueso a los sulfatos

Tamiz		Porcentaje Parcial retenido	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Porcentaje después del ensayo (%)	Desgaste Parcial (%)	Comprobación ASTM C 33 (15%)
Pasa	Retiene						
3/4	3/8	57,48	1003,1	974,9	2,81	1,62	Cumple
3/2	3/8	36,1	671,5	631,4	5,97	2,16	Cumple
3/8	4	25,12	330,9	309,7	6,41	1,61	Cumple
					Total	5,38	Cumple

Fuente: Propia

Tabla 38. Desgaste del Agregado fino a los sulfatos

Tamiz	Porcentaje Parcial retenido	Masa Inicial (gr)	Masa Final (gr)	Porcentaje después del ensayo (%)	Desgaste Parcial (%)	Comprobación ASTM C 33 (10%)
N° 8	18,91	101,26	98,12	3,10	0,59	Cumple
N° 16	23,46	100,89	96,96	3,90	0,91	Cumple
N° 30	18,07	100,91	97,69	3,19	0,58	Cumple
N° 50	14,5	103,23	100,25	2,89	0,42	Cumple
				Total	2,50	Cumple

Fuente: Propia

4.2. Propiedades del Cemento

4.2.1. Gravedad específica (ASTM C 188)

Tabla 39. Gravedad específica del cemento (HOLCIM tipo GU)

Muestras	1	2
Masa (g)	64	64
Volumen Inicial (cm3)	0,7	0,8
Volumen Final (cm3)	22,7	22,9
Gravedad Específica	2,91	2,90
Promedio (g/cm3)	2,90	

Fuente: Propia

4.2.2. Finura Blaine (ASTM C 204)

Tabla 40. Finura Blaine (Cemento HOLCIM tipo GU)

Muestra	Finura (m ² /kg)	Requisitos ASTM C 595 (260-430)
1	316,8	Cumple
2	315,2	Cumple
Promedio	316	Cumple

Fuente: Propia

4.2.3. Tiempo de fraguado Vicat (ASTM C 1005)

Cemento (gr)	650
Agua (gr)	182

Tabla 41. Tiempo de fraguado Vicat (Cemento HOLCIM tipo GU)

Descripción	Hora	Comprobación ASTM C 595 (45-420 min)
Hora de inicio del ensayo	9:00	0
Tiempo de fraguado inicial (min)	10:51	111
Tiempo de fraguado final (min)	15:03	363

Fuente: Propia

4.2.4. Expansión en el Autoclave (ASTM C 151)

Cemento (gr)	650
Agua (gr)	176,01
Muestra 1 (mm)	253,1
Muestra 2 (mm)	253,9

Tabla 42. Expansión en el Autoclave (Cemento HOLCIM tipo GU)

Muestra	Lado	Lectura inicial	Lectura final	Expansión (%)	Promedio Expansión (%)	Límite máximo según ASTM C 595 (%)
1	1	-0,259	-0,07	0,740	0,76	0,8
	2	-0,27	-0,08	0,768		
	3	-0,271	-0,07	0,776		
	4	-0,261	-0,07	0,752		
2	1	-0,666	-0,48	0,736		
	2	-0,667	-0,48	0,748		
	3	-0,669	-0,48	0,764		
	4	-0,671	-0,47	0,795		

Fuente: Propia

4.2.5. Consistencia Normal del Cemento (ASTM C 187)

Tabla 43. Consistencia normal del cemento (Cemento HOLCIM tipo GU)

Muestra	Cemento (gr)	Agua (gr)	Relación agua/cemento	Penetración (mm)	Porcentaje agua necesaria para la consistencia normal
M1	650	199	0,282	9	28,2%
M2	650	204	0,283	9	

Fuente: Propia

4.2.6. Resistencia a la compresión de Morteros Normalizados (ASTM C 109)

Tabla 44. Resistencia a la Compresión de morteros Normalizados (Cemento HOLCIM tipo GU)

Muestra	m1	m2	m3	m4	m5	m6
Edad de la muestra (días)	3	3	7	7	28	28
Ancho (mm)	50	50,2	50,9	50,5	50,1	51,1
Largo (mm)	49,9	50,1	50,2	50,4	49,9	50,7
Altura (mm)	49,2	49,7	49,4	50,1	49,8	49,1
Área (cm ²)	24,95	25,15	25,55	25,45	25,00	25,91
Peso (gr)	272,1	273	273,4	274,1	272,7	273,9
Carga (kg)	4398,6	4365,7	6455,9	6566,2	7067,7	7115,5
Resistencia (kg/cm ²)	176,30	173,59	252,66	257,98	282,71	274,65
Resistencia mínima según ASTM C 595 (kg/cm ²)	130		200		250	

Fuente: Propia

4.3. Propiedades del Polvo de Neumático Reciclado

4.3.1. Contenido de Humedad (ASTM D 1864)

Tabla 45. Contenido de humedad del PNR

Muestra	m1	m2	m3
Masa del contenedor (gr)	104,35	104,35	104,35
Masa original de la muestra y contenedor (gr)	163,93	163,90	163,87
Masa del contenedor y la muestra secados (gr)	163,78	163,76	163,74
Contenido de humedad en peso y libre flujo (%)	0,09	0,09	0,08
Contenido de humedad promedio (%)	0,09		

Fuente: Propia

4.3.2. Partículas Ferrosas (INEN 2680)

Tabla 46. Partículas Ferrosas del PNR

Muestra	M1	M2	M3
Masa inicial de la muestra (gr)	50,013	50,028	50,081
Masa final (gr)	49,982	49,989	50,017
Porcentaje de partículas ferrosas (%)	0,06	0,08	0,13
Promedio (%)	0,089		

Fuente: Propia

4.3.3. Granulometría (ASTM D 5644)

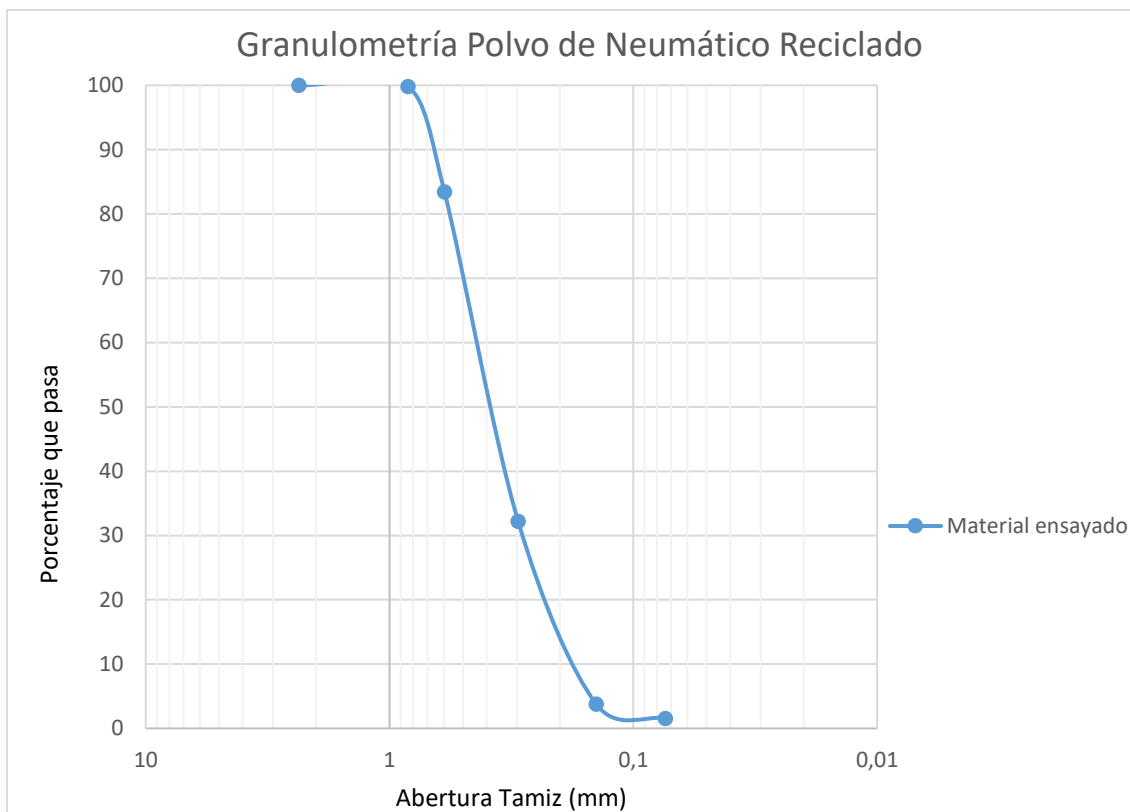
Masa seca de la Muestra (gr)	100
Masa del Talco Añadido (gr)	5

Tabla 47. Granulometría del PNR

Tamiz	abertura (mm)	Masa Retenida Parcial (gr)	Porcentaje retenido	Porcentaje retenido acumulado	Porcentaje que pasa
N° 8	2,36	0	0,00	0,00	100,00
N° 20	0,841	0,19	0,18	0,18	99,82
N° 30	0,595	17,2	16,40	16,58	83,42
N° 50	0,297	53,67	51,18	67,77	32,23
N° 100	0,142	29,82	28,44	96,20	3,80
N° 200	0,074	2,36	2,25	98,46	1,54
Base		1,62	1,54	100,00	
Total		104,86			
				MF	1,81

Fuente: Propia

Gráfica 3. Granulometría del polvo de neumático reciclado



Fuente: Propia

4.3.4. Porcentaje de Fibra (INEN 2680)

Tabla 48. Contenido de fibra del PNR

Muestra	m1	m2	m3
Masa de la muestra original (gr)	100	100	100
Masa luego de la remoción de fibra (gr)	99,83	99,8	99,89
Masa de fibra (gr)	0,17	0,2	0,11
Porcentaje de fibra (%)	0,17	0,20	0,11
Promedio (%)		0,16	

Fuente: Propia

4.4. Ensayos del Hormigón en estado endurecido

4.4.1. Resistencia a la compresión (ASTM C 39)

4.4.1.1. Muestra Patrón $f'c$ esperado = 210 kg/m² (a/c= 0,542), edad 7 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,542	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	7 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	0%	Fecha:	17/7/2019

Muestra	1	2	3	4	5
Fecha de Fabricación	10/7/2019	10/7/2019	10/7/2019	10/7/2019	10/7/2019
Fecha de ensayo	17/7/2019	17/7/2019	17/7/2019	17/7/2019	17/7/2019
Días Curación	7	7	7	7	7
Diámetro 1 (mm)	154,13	150,84	151,33	152,35	150,35
Diámetro 2 (mm)	153,58	151,56	152,58	153,01	150,87
Altura 1 (mm)	303,62	300,8	300,45	301,03	300,42
Altura 2 (mm)	305,82	299,79	300,44	300,65	300,89
Altura 3 (mm)	305,01	299,48	299,64	300,48	300,77
Masa (kg)	12800	12180	12170	12050	12100
Carga Máxima (KN)	239,3	225,1	235,82	241,21	230,14
Tipo de falla	V	V	V	V	V
Altura Promedio (mm)	304,82	300,02	300,18	300,72	300,69
Promedio diámetro (cm)	15,3855	15,12	15,1955	15,268	15,061
Carga (N)	239300	225100	235820	241210	230140
Resistencia (Kg/cm ²)	131,21	127,79	132,55	134,30	131,68
$f'c$ Promedio (Kg/cm ²)	131,51				
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	2,39				
$f'c$ Característico (Kg/cm ²)	128,29				

4.4.1.2. Muestra alterada con PNR 5%; Relación a/c = 0,542, edad 7 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,542	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	7 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	5%	Fecha:	11/9/2019

Muestra	2	6	7	8	9
Fecha de Fabricación	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019
Fecha de ensayo	11/9/2019	11/9/2019	11/9/2019	11/9/2019	11/9/2019
Días Curación	7	7	7	7	7
Diámetro 1 (mm)	153,04	151,33	152,64	153	151,95
Diámetro 2 (mm)	153,42	150,85	151,27	150,23	152,32
Altura 1 (mm)	303,28	299,89	307,22	300,44	305,27
Altura 2 (mm)	302,89	298,33	305,57	300,96	306
Altura 3 (mm)	302,16	298,8	304,54	299,15	308,35
Masa (kg)	12,3	11,835	12,235	11,855	12,21
Carga Máxima (KN)	342,3	323,5	324,8	354,1	319,8
Tipo de falla	V	V	V	V	V
Altura Promedio (mm)	302,78	299,01	305,78	300,18	306,54
Promedio diámetro (cm)	15,323	15,109	15,1955	15,1615	15,2135
Carga (N)	342300	323500	324800	354100	319800
Resistencia (Kg/cm ²)	189,22	183,93	182,57	199,93	179,33
f'c Promedio (Kg/cm ²)	187,00				
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	8,06				
f'c Característico (Kg/cm ²)	176,11				

4.4.1.3. Muestra alterada con PNR 15%; Relación a/c = 0,542, edad 7 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,542	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	7 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	15%	Fecha:	11/9/2019

Muestra	1	4	7	8	9
Fecha de Fabricación	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019
Fecha de ensayo	11/9/2019	11/9/2019	11/9/2019	11/9/2019	11/9/2019
Días Curación	7	7	7	7	7
Diámetro 1 (mm)	153,96	150,03	151,41	149,67	149,9
Diámetro 2 (mm)	153,68	152,3	151,37	150,48	151,79
Altura 1 (mm)	303,02	299,73	298,34	298,99	300,51
Altura 2 (mm)	302,91	300,29	299,44	298,98	299,4
Altura 3 (mm)	303,43	300,74	300,45	299,15	299,17
Masa (kg)	12,07	11,055	11,585	11,345	11,37
Carga Máxima (KN)	243,8	229,4	271	241,7	235,4
Tipo de falla	V	V	V	V	V
Altura Promedio (mm)	303,12	300,25	299,41	299,04	299,69
Promedio diámetro (cm)	15,382	15,1165	15,139	15,0075	15,0845
Carga (N)	243800	229400	271000	241700	235400
Resistencia (Kg/cm ²)	133,74	130,30	153,47	139,28	134,27
f'c Promedio (Kg/cm ²)	138,21				
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	9,11				
f'c Característico (Kg/cm ²)	125,91				

4.4.1.4. Muestra alterada con PNR 25%; Relación a/c = 0,542, edad 7 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,542	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	7 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	25%	Fecha:	12/9/2019

Muestra	1	2	3	4	5
Fecha de Fabricación	5/9/2019	5/9/2019	5/9/2019	5/9/2019	5/9/2019
Fecha de ensayo	12/9/2019	12/9/2019	12/9/2019	12/9/2019	12/9/2019
Días Curación	7	7	7	7	7
Diámetro 1 (mm)	152,38	150,73	150,52	153,59	151,3
Diámetro 2 (mm)	151,23	151,76	153,35	153,2	152,71
Altura 1 (mm)	305,5	300,46	301,03	304,16	304,28
Altura 2 (mm)	306,66	300,01	299,36	305,8	305,87
Altura 3 (mm)	304,58	300,45	300,72	305,65	303,99
Masa (kg)	11,43	11,27	11,35	11,58	11,48
Carga Máxima (KN)	178,3	154,99	161,6	185,15	179,9
Tipo de falla	V	V	V	V	V
Altura Promedio (mm)	305,58	300,31	300,37	305,20	304,71
Promedio diámetro (cm)	15,1805	15,1245	15,1935	15,3395	15,2005
Carga (N)	178300	154990	161600	185150	179900
Resistencia (Kg/cm ²)	100,42	87,94	90,86	102,13	101,05
f'c Promedio (Kg/cm ²)	96,48				
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	6,57				
f'c Característico (Kg/cm ²)	87,60				

4.4.1.5. Muestra alterada con PNR 35%; Relación a/c = 0,542, edad 7 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,542	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	7 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	35%	Fecha:	12/9/2019

Muestra	1	2	3	4	5
Fecha de Fabricación	5/9/2019	5/9/2019	5/9/2019	5/9/2019	5/9/2019
Fecha de ensayo	12/9/2019	12/9/2019	12/9/2019	12/9/2019	12/9/2019
Días Curación	7	7	7	7	7
Diámetro 1 (mm)	150,9	153,65	150,3	153,16	153,19
Diámetro 2 (mm)	151,28	153,04	150,95	153,44	153,17
Altura 1 (mm)	300,73	302,87	299,59	302,05	300,35
Altura 2 (mm)	300,53	304,01	299,28	301,75	300,17
Altura 3 (mm)	300,64	303,43	298,5	301,55	300,65
Masa (kg)	10,83	11,33	10,69	11,34	11,12
Carga Máxima (KN)	107,1	103,62	111,02	119,65	109,87
Tipo de falla	V	V	V	V	V
Altura Promedio (mm)	300,63	303,44	299,12	301,78	300,39
Promedio diámetro (cm)	15,109	15,3345	15,0625	15,33	15,318
Carga (N)	107100	103620	111020	119650	109870
Resistencia (Kg/cm ²)	60,89	57,19	63,51	66,08	60,77
f'c Promedio (Kg/cm ²)	61,69				
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	3,33				
f'c Característico (Kg/cm ²)	57,20				

4.4.1.6. Muestra Patrón $f'c$ esperado = 240 kg/m² ($a/c = 0,493$), edad 7 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,493	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	7 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	0%	Fecha:	20/8/2019

Muestra	240 A	240 B	240 C	4	5
Fecha de Fabricación	13/8/2019	13/8/2019	13/8/2019	13/8/2019	13/8/2019
Fecha de ensayo	20/8/2019	20/8/2019	20/8/2019	20/8/2019	20/8/2019
Días Curación	7	7	7	7	7
Diámetro 1 (mm)	152,72	150,08	150,67	150,57	153,8
Diámetro 2 (mm)	151,42	150,97	149,46	150,58	154,37
Altura 1 (mm)	306,74	301,27	300,85	299,6	305,77
Altura 2 (mm)	306,68	301,73	300,49	299,51	303,58
Altura 3 (mm)	306,45	300,92	300,5	299,49	303,68
Masa (kg)	12,36	12,02	11,86	12,1	12,83
Carga Máxima (KN)	258,8	287,1	289,2	302,1	306,04
Tipo de falla	V	V	V	V	V
Altura Promedio (mm)	306,62	301,31	300,61	299,53	304,34
Promedio diámetro (cm)	15,207	15,0525	15,0065	15,0575	15,4085
Carga (N)	258800	287100	289200	302100	306040
Resistencia (Kg/cm ²)	145,25	164,46	166,68	172,94	167,30
$f'c$ Promedio (Kg/cm ²)	163,33				
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	10,58				
$f'c$ Característico (Kg/cm ²)	149,05				

4.4.1.7. Muestra alterada con PNR 5%; Relación a/c= 0,493, edad 7 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,493	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	7 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	5%	Fecha:	10/9/2019

Muestra	1	4	5	9	10
Fecha de Fabricación	3/9/2019	3/9/2019	3/9/2019	3/9/2019	3/9/2019
Fecha de ensayo	10/9/2019	10/9/2019	10/9/2019	10/9/2019	10/9/2019
Días Curación	7	7	7	7	7
Diámetro 1 (mm)	152,97	151,99	152,73	151,76	151,08
Diámetro 2 (mm)	153,16	151,99	151,98	150,68	151,73
Altura 1 (mm)	307,42	305,76	306,86	300,95	301,31
Altura 2 (mm)	308,22	305,92	306,76	300,75	301,14
Altura 3 (mm)	307,16	305,72	306,77	300,73	302,51
Masa (kg)	12,47	12,07	12,26	11,82	11,89
Carga Máxima (KN)	468,3	405,6	446,6	408,7	407
Tipo de falla	V	V	V	V	V
Altura Promedio (mm)	307,60	305,80	306,80	300,81	301,65
Promedio diámetro (cm)	15,3065	15,199	15,2355	15,122	15,1405
Carga (N)	468300	405600	446600	408700	407000
Resistencia (Kg/cm ²)	259,43	227,88	249,72	231,97	230,44
f'c Promedio (Kg/cm ²)	239,89				
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	13,91				
f'c Característico (Kg/cm ²)	221,10				

4.4.1.8. Muestra alterada con PNR 15%; Relación a/c= 0,493, edad 7 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,493	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	7 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	15%	Fecha:	10/9/2019

Muestra	2	5	6	7	8
Fecha de Fabricación	3/9/2019	3/9/2019	3/9/2019	3/9/2019	3/9/2019
Fecha de ensayo	10/9/2019	10/9/2019	10/9/2019	10/9/2019	10/9/2019
Días Curación	7	7	7	7	7
Diámetro 1 (mm)	149,69	150,98	150,98	150,48	152,6
Diámetro 2 (mm)	150,56	150,36	151,25	150,36	151,38
Altura 1 (mm)	301,49	298,92	300,72	300,56	301,68
Altura 2 (mm)	300,93	299,45	300,61	299,99	301,39
Altura 3 (mm)	301,1	299,46	301,75	300,34	300,94
Masa (kg)	11,2	11,17	11,34	11,23	11,38
Carga Máxima (KN)	270,9	266,4	264,2	267,7	307
Tipo de falla	V	V	V	V	V
Altura Promedio (mm)	301,17	299,28	301,03	300,30	301,34
Promedio diámetro (cm)	15,0125	15,067	15,1115	15,042	15,199
Carga (N)	270900	266400	264200	267700	307000
Resistencia (Kg/cm ²)	156,01	152,31	150,16	153,56	172,48
f'c Promedio (Kg/cm ²)	156,90				
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	8,96				
f'c Característico (Kg/cm ²)	144,80				

4.4.1.9. Muestra alterada con PNR 25%; Relación a/c= 0,493, edad 7 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,493	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	7 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	25%	Fecha:	11/9/2019

Muestra	2	5	6	7	9
Fecha de Fabricación	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019
Fecha de ensayo	11/9/2019	11/9/2019	11/9/2019	11/9/2019	11/9/2019
Días Curación	7	7	7	7	7
Diámetro 1 (mm)	149,71	153,89	154,01	152,08	150,68
Diámetro 2 (mm)	149,87	151,38	153,1	153,72	152,3
Altura 1 (mm)	302,52	305,26	307,76	304,29	302,01
Altura 2 (mm)	301,48	304,53	306,27	304,93	301,81
Altura 3 (mm)	302,47	306,15	306,65	304,79	300,99
Masa (kg)	11,35	11,21	11,425	11,46	11,46
Carga Máxima (KN)	197,89	186,38	186,52	225,4	221,9
Tipo de falla	V	V	V	V	V
Altura Promedio (mm)	302,16	305,31	306,89	304,67	301,60
Promedio diámetro (cm)	14,979	15,2635	15,3555	15,29	15,149
Carga (N)	197890	186380	186520	225400	221900
Resistencia (Kg/cm ²)	114,47	103,83	102,67	125,14	125,50
f'c Promedio (Kg/cm ²)	114,32				
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	11,04				
f'c Característico (Kg/cm ²)	99,42				

4.4.1.10. Muestra alterada con PNR 35%; Relación a/c= 0,493, edad 7 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,493	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	7 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	35%	Fecha:	11/9/2019

Muestra	2	3	6	7	8
Fecha de Fabricación	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019
Fecha de ensayo	11/9/2019	11/9/2019	11/9/2019	11/9/2019	11/9/2019
Días Curación	7	7	7	7	7
Diámetro 1 (mm)	153,78	151,88	152,2	154,16	151,01
Diámetro 2 (mm)	153,25	152,34	152,67	153,05	151,14
Altura 1 (mm)	302,22	300,94	300,88	305,72	299,17
Altura 2 (mm)	300,94	300,59	300,34	306,69	299,26
Altura 3 (mm)	300,95	300,94	300,54	305,48	298,37
Masa (kg)	11,105	10,965	11	11,095	10,61
Carga Máxima (KN)	161,76	162,36	127,04	141,09	161,79
Tipo de falla	V	V	V	V	V
Altura Promedio (mm)	301,37	300,82	300,59	305,96	298,93
Promedio diámetro (cm)	15,3515	15,211	15,2435	15,3605	15,1075
Carga (N)	161760	162360	127040	141090	161790
Resistencia (Kg/cm ²)	89,09	91,08	70,96	77,61	92,00
f'c Promedio (Kg/cm ²)	84,15				
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	9,36				
f'c Característico (Kg/cm ²)	71,51				

4.4.1.11. Muestra Patrón $f'c$ esperado = 210 kg/m² ($a/c = 0,542$), edad 28 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,542	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	28 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	0%	Fecha:	8/8/2019

Muestra	Tesis B	Tesis D	Tesis F	7	8
Fecha de fabricación	10/7/2019	10/7/2019	10/7/2019	10/7/2019	10/7/2019
Fecha de ensayo	8/8/2019	8/8/2019	8/8/2019	8/8/2019	8/8/2019
Días curación	28	28	28	28	28
Diámetro 1 (mm)	150,75	152,49	150,07	151,21	150,66
Diámetro 2 (mm)	150,3	151,22	150,99	150,98	150,48
Altura 1 (mm)	301,06	298,75	299,13	299,91	301,33
Altura 2 (mm)	300,82	299,18	299,56	300,21	300,87
Altura 3 (mm)	301,36	298,8	299,43	300,17	301,41
Masa (kg)	12,09	12,22	12,03	11,92	11,915
Carga máxima (KN)	384,6	396,7	378,65	401,7	395,27
Tipo de falla	V	V	V	V	V
Altura Promedio (mm)	301,08	298,91	299,37	300,10	301,20
Promedio diámetro (cm)	15,05	15,19	15,05	15,11	15,06
Carga (N)	384600	396700	378650	401700	395270
Resistencia (Kg/cm ²)	220,31	223,28	216,89	228,37	226,29
Densidad (ton/m ³)	2,257	2,257	2,258	2,215	2,222
Densidad característica (ton/m ³)	2,213				
$f'c$ Promedio (Kg/cm ²)	223,03				
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	4,59				
$f'c$ Característico (Kg/cm ²)	216,83				

4.4.1.12. Muestra alterada con PNR 5%; Relación a/c= 0,542, edad 28 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,542	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	28 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	5%	Fecha:	2/10/2019

Muestra	1	5	6	8	10
Fecha de fabricación	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019
Fecha de ensayo	2/10/2019	2/10/2019	2/10/2019	2/10/2019	2/10/2019
Días curación	28	28	28	28	28
Diámetro 1 (mm)	151,4	153,09	150,12	150,95	153,53
Diámetro 2 (mm)	153,46	152,05	150,35	150,55	153,42
Altura 1 (mm)	303,15	302,25	298,97	298,62	305,64
Altura 2 (mm)	304,26	302,71	298,89	298,89	304,47
Altura 3 (mm)	302,73	302,06	298,8	298,67	308,38
Masa (kg)	12,15	12,1	11,81	11,88	12,16
Carga máxima (KN)	464,021	458,7	472,02	451,5	452,07
Tipo de falla	V	VI	VI	V	V
Altura Promedio (mm)	303,38	302,34	298,89	298,73	306,16
Promedio diámetro (cm)	15,24	15,26	15,02	15,08	15,35
Carga (N)	464021	458700	472020	451500	452070
Resistencia (Kg/cm ²)	259,20	255,76	271,43	257,86	249,10
Densidad (ton/m ³)	2,195	2,189	2,229	2,228	2,147
Densidad característica (ton/m ³)	2,152				
f'c Promedio (Kg/cm ²)	258,67				
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	8,12				
f'c Característico (Kg/cm ²)	247,71				

4.4.1.13. Muestra alterada con PNR 15%; Relación a/c= 0,542, edad 28 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,542	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	28 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	15%	Fecha:	2/10/2019

Muestra	2	4	6	8	10
Fecha de fabricación	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019
Fecha de ensayo	2/10/2019	2/10/2019	2/10/2019	2/10/2019	2/10/2019
Días curación	28	28	28	28	28
Diámetro 1 (mm)	150,86	150,28	151,03	153,53	151,66
Diámetro 2 (mm)	151,93	149,3	149,97	154,16	151,36
Altura 1 (mm)	299,41	300,8	297,52	304,52	301,57
Altura 2 (mm)	299,5	300,82	298,96	305,9	302,22
Altura 3 (mm)	300,02	300,68	298,62	305,36	301,8
Masa (kg)	11,46	11,47	11,445	12,155	11,165
Carga máxima (KN)	340,27	327	357,53	358,1	303,36
Tipo de falla	VI	VI	VI	V	V
Altura Promedio (mm)	299,64	300,77	298,37	305,26	301,86
Promedio diámetro (cm)	15,14	14,98	15,05	15,38	15,15
Carga (N)	340270	327000	357530	358100	303360
Resistencia (Kg/cm ²)	192,68	189,16	204,87	196,37	171,52
Densidad (ton/m ³)	2,125	2,164	2,156	2,142	2,052
Densidad característica (ton/m ³)	2,067				
f'c Promedio (Kg/cm ²)	190,92				
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	12,32				
f'c Característico (Kg/cm ²)	174,29				

4.4.1.14. Muestra alterada con PNR 25%; Relación a/c= 0,542, edad 28 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,542	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	28 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	25%	Fecha:	2/10/2019

Muestra	1	2	3	4	5
Fecha de fabricación	5/9/2019	5/9/2019	5/9/2019	5/9/2019	5/9/2019
Fecha de ensayo	3/10/2019	3/10/2019	3/10/2019	3/10/2019	3/10/2019
Días curación	28	28	28	28	28
Diámetro 1 (mm)	151,17	152,98	150,17	151,07	151,35
Diámetro 2 (mm)	152,95	151,85	150,99	151,22	152,22
Altura 1 (mm)	301,08	306,9	298,81	299,81	305,72
Altura 2 (mm)	301,57	306,49	299,03	300,35	304,68
Altura 3 (mm)	299,69	305,14	300	300,51	305,02
Masa (kg)	11,32	11,47	10,87	11,14	11,57
Carga máxima (KN)	233,7	217,5	205,03	241,9	216,8
Tipo de falla	V	V	V	V	V
Altura Promedio (mm)	300,78	306,18	299,28	300,22	305,14
Promedio diámetro (cm)	15,21	15,24	15,06	15,11	15,18
Carga (N)	233700	217500	205030	241900	216800
Resistencia (Kg/cm ²)	131,18	121,52	117,36	137,43	122,14
Densidad (ton/m ³)	2,072	2,053	2,040	2,068	2,095
Densidad característica (ton/m ³)	2,037				
f'c Promedio (Kg/cm ²)	125,93				
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	8,17				
f'c Característico (Kg/cm ²)	114,89				

4.4.1.15. Muestra alterada con PNR 35%; Relación a/c= 0,542, edad 28 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,542	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	28 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	35%	Fecha:	3/10/2019

Muestra	1	2	3	4	5
Fecha de fabricación	5/9/2019	5/9/2019	5/9/2019	5/9/2019	5/9/2019
Fecha de ensayo	3/10/2019	3/10/2019	3/10/2019	3/10/2019	3/10/2019
Días curación	28	28	28	28	28
Diámetro 1 (mm)	149,84	150,13	149,79	151,73	152,87
Diámetro 2 (mm)	150,01	150,66	149,64	150,75	153,14
Altura 1 (mm)	300,4	299,1	299,5	300,92	304,79
Altura 2 (mm)	300,39	299,43	299,72	301,51	305,18
Altura 3 (mm)	299,04	300,21	298,48	300,1	305,08
Masa (kg)	10,83	10,73	10,83	11,01	11,085
Carga máxima (KN)	136,67	155,97	143,82	163	166,5
Tipo de falla	V	V	V	V	V
Altura Promedio (mm)	299,94	299,58	299,23	300,84	305,02
Promedio diámetro (cm)	14,99	15,04	14,97	15,12	15,30
Carga (N)	136670	155970	143820	163000	166500
Resistencia (Kg/cm ²)	78,92	89,50	83,28	92,49	92,31
Densidad (ton/m ³)	2,045	2,016	2,056	2,037	1,977
Densidad característica (ton/m ³)	1,984				
f'c Promedio (Kg/cm ²)	87,30				
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	5,99				
f'c Característico (Kg/cm ²)	79,22				

4.4.1.16. Muestra Patrón $f'c$ esperado = 240 kg/m² (a/c = 0,493), edad 28 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,493	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	28 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	0%	Fecha:	3/10/2019

Muestra	P A	PB	PC	7	8
Fecha de fabricación	13/8/2019	13/8/2019	13/8/2019	13/8/2019	13/8/2019
Fecha de ensayo	10/9/2019	10/9/2019	10/9/2019	10/9/2019	10/9/2019
Días curación	28	28	28	28	28
Diámetro 1 (mm)	152,28	150,07	150,84	152,6	153,28
Diámetro 2 (mm)	151,74	151,29	151,7	154,42	153,73
Altura 1 (mm)	306,69	301,05	300,04	304,38	304,93
Altura 2 (mm)	308,52	302,98	302,07	304,43	305,18
Altura 3 (mm)	305,57	303,4	301,43	305,53	305,64
Masa (kg)	12,46	12,01	12,05	12,61	12,63
Carga máxima (KN)	455,72	430,56	451,6	463,12	465,91
Tipo de falla	V	V	V	V	V
Altura Promedio (mm)	306,93	302,48	301,18	304,78	305,25
Promedio diámetro (cm)	15,20	15,07	15,13	15,35	15,35
Carga (N)	455720	430560	451600	463120	465910
Resistencia (Kg/cm ²)	255,97	246,13	256,15	255,07	256,62
Densidad (ton/m ³)	2,237	2,227	2,226	2,235	2,236
Densidad característica (ton/m ³)	2,225				
$f'c$ Promedio (Kg/cm ²)	253,99				
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	4,43				
$f'c$ Característico (Kg/cm ²)	248,01				

4.4.1.17. Muestra alterada con PNR 5%; Relación a/c= 0,493, edad 28 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,493	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	28 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	5%	Fecha:	1/10/2019

Muestra	2	3	6	7	8
Fecha de fabricación	3/9/2019	3/9/2019	3/9/2019	3/9/2019	3/9/2019
Fecha de ensayo	1/10/2019	1/10/2019	1/10/2019	1/10/2019	1/10/2019
Días curación	28	28	28	28	28
Diámetro 1 (mm)	151,29	151,67	151,17	151,51	153,16
Diámetro 2 (mm)	150,66	151,53	150,53	150,95	153,44
Altura 1 (mm)	302,31	305,55	302,14	300,66	306,84
Altura 2 (mm)	303,05	306,91	303,41	300,56	306,93
Altura 3 (mm)	301,41	306,95	301,94	301,26	306,97
Masa (kg)	11,85	12,12	11,78	11,82	12,355
Carga máxima (KN)	529,8	537,35	515,33	505,02	506,3
Tipo de falla	V	V	V	V	V
Altura Promedio (mm)	302,26	306,47	302,50	300,83	306,91
Promedio diámetro (cm)	15,10	15,16	15,09	15,12	15,33
Carga (N)	529800	537350	515330	505020	506300
Resistencia (Kg/cm ²)	301,68	303,46	293,92	286,60	279,62
Densidad (ton/m ³)	2,190	2,191	2,179	2,187	2,181
Densidad característica (ton/m ³)	2,178				
f'c Promedio (Kg/cm ²)	293,06				
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	10,07				
f'c Característico (Kg/cm ²)	279,46				

4.4.1.18. Muestra alterada con PNR 15%; Relación a/c= 0,493, edad 28 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,493	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	28 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	15%	Fecha:	1/10/2019

Muestra	1	3	4	9	10
Fecha de fabricación	3/9/2019	3/9/2019	3/9/2019	3/9/2019	3/9/2019
Fecha de ensayo	1/10/2019	1/10/2019	1/10/2019	1/10/2019	1/10/2019
Días curación	28	28	28	28	28
Diámetro 1 (mm)	150,7	153,51	149,89	153,09	153,79
Diámetro 2 (mm)	149,95	153,86	151,34	150,43	153,55
Altura 1 (mm)	301,57	306,2	301,53	306,78	306
Altura 2 (mm)	300,66	306,54	300,67	306,94	305,81
Altura 3 (mm)	301,95	307,11	301,2	306,86	305,16
Masa (kg)	11,205	12,005	11,3	11,615	11,95
Carga máxima (KN)	364,65	386,6	401	392,79	405,2
Tipo de falla	VI	VI	VI	V	V
Altura Promedio (mm)	301,39	306,62	301,13	306,86	305,66
Promedio diámetro (cm)	15,03	15,37	15,06	15,18	15,37
Carga (N)	364650	386600	401000	392790	405200
Resistencia (Kg/cm ²)	209,44	212,44	229,43	221,35	222,71
Densidad (ton/m ³)	2,095	2,111	2,106	2,093	2,108
Densidad característica (ton/m ³)	2,091				
f ^o c Promedio (Kg/cm ²)	219,07				
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	8,10				
f ^o c Característico (Kg/cm ²)	208,14				

4.4.1.19. Muestra alterada con PNR 25%; Relación a/c= 0,493, edad 28 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,493	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	28 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	25%	Fecha:	2/10/2019

Muestra	1	5	6	8	9
Fecha de fabricación	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019
Fecha de ensayo	2/10/2019	2/10/2019	2/10/2019	2/10/2019	2/10/2019
Días curación	28	28	28	28	28
Diámetro 1 (mm)	152,5	151,47	151,64	152,17	151,58
Diámetro 2 (mm)	152,87	150,04	151,72	151,48	151,12
Altura 1 (mm)	300,96	300,29	304,78	300,66	300,02
Altura 2 (mm)	302,44	299,59	304,07	300,57	301,69
Altura 3 (mm)	300,83	298,37	304,25	301,14	299,7
Masa (kg)	11,345	11,03	11,33	11,155	11,095
Carga máxima (KN)	271	257,02	262,78	298,5	296,7
Tipo de falla	V	V	V	V	V
Altura Promedio (mm)	301,41	299,42	304,37	300,79	300,47
Promedio diámetro (cm)	15,27	15,08	15,17	15,18	15,14
Carga (N)	271000	257020	262780	298500	296700
Resistencia (Kg/cm ²)	150,88	146,78	148,24	168,07	168,11
Densidad (ton/m ³)	2,056	2,064	2,060	2,048	2,052
Densidad característica (ton/m ³)	2,048				
f ^c Promedio (Kg/cm ²)	156,42				
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	10,76				
f ^c Característico (Kg/cm ²)	141,89				

4.4.1.20. Muestra alterada con PNR 35%; Relación a/c= 0,493, edad 28 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,493	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	28 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	35%	Fecha:	2/10/2019

Muestra	1	5	6	8	9
Fecha de fabricación	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019
Fecha de ensayo	2/10/2019	2/10/2019	2/10/2019	2/10/2019	2/10/2019
Días curación	28	28	28	28	28
Diámetro 1 (mm)	150,67	152,07	152,82	152,55	149,66
Diámetro 2 (mm)	151,26	152,19	153,63	151,7	150,2
Altura 1 (mm)	298,91	304,65	305,68	301,53	300,82
Altura 2 (mm)	300,78	303,85	305,99	302,68	301,32
Altura 3 (mm)	300,5	304,25	305,72	302,15	301,6
Masa (kg)	10,745	11,12	11,43	11,015	10,865
Carga máxima (KN)	190,91	194,127	214,69	185,73	198,8
Tipo de falla	V	V	V	V	V
Altura Promedio (mm)	300,06	304,25	305,80	302,12	301,25
Promedio diámetro (cm)	15,10	15,21	15,32	15,21	14,99
Carga (N)	190910	194127	214690	185730	198800
Resistencia (Kg/cm ²)	108,72	108,87	118,68	104,17	114,78
Densidad (ton/m ³)	2,001	2,011	2,027	2,006	2,043
Densidad característica (ton/m ³)	1,994				
f'c Promedio (Kg/cm ²)	111,04				
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	5,70				
f'c Característico (Kg/cm ²)	103,35				

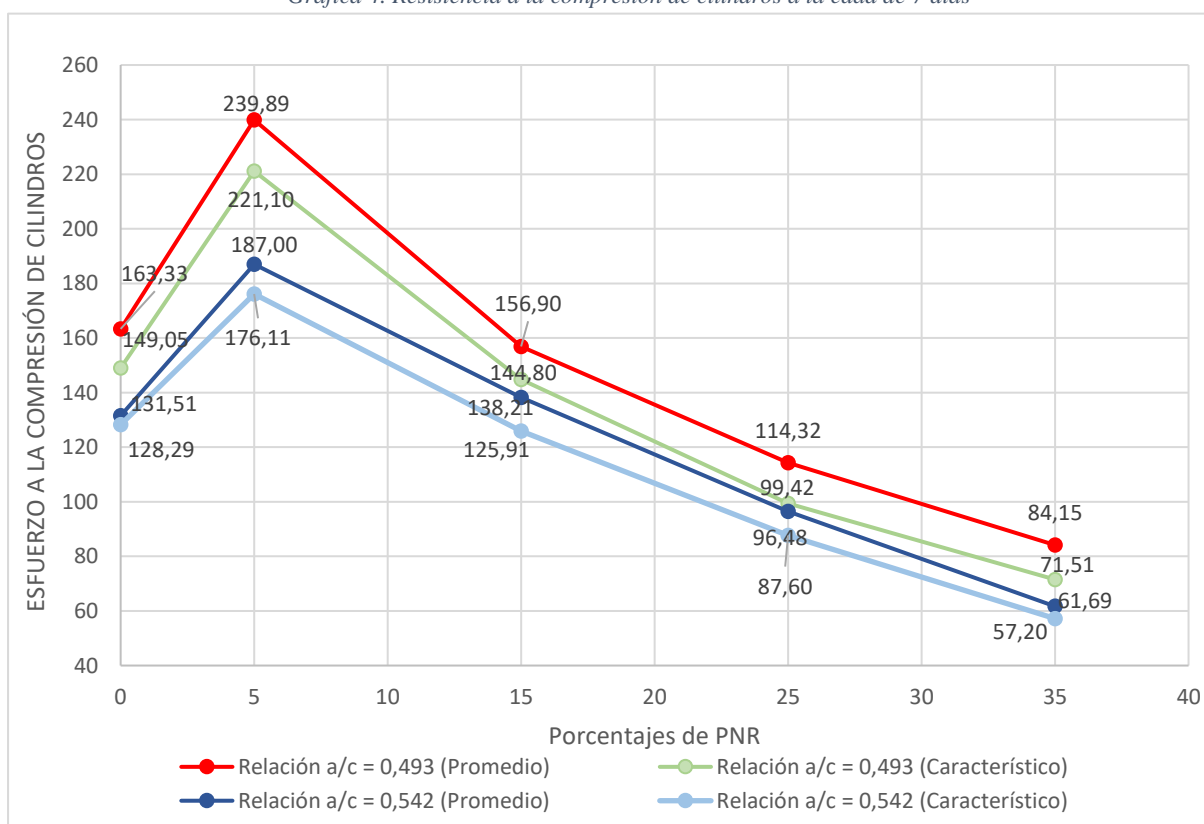
4.4.1.21. Resumen resistencia de cilindros a la edad de 7 y 28 días

Tabla 49. Resumen de resistencias promedio, características y desempeño de resistencia, a las edades de 7 y 28 días

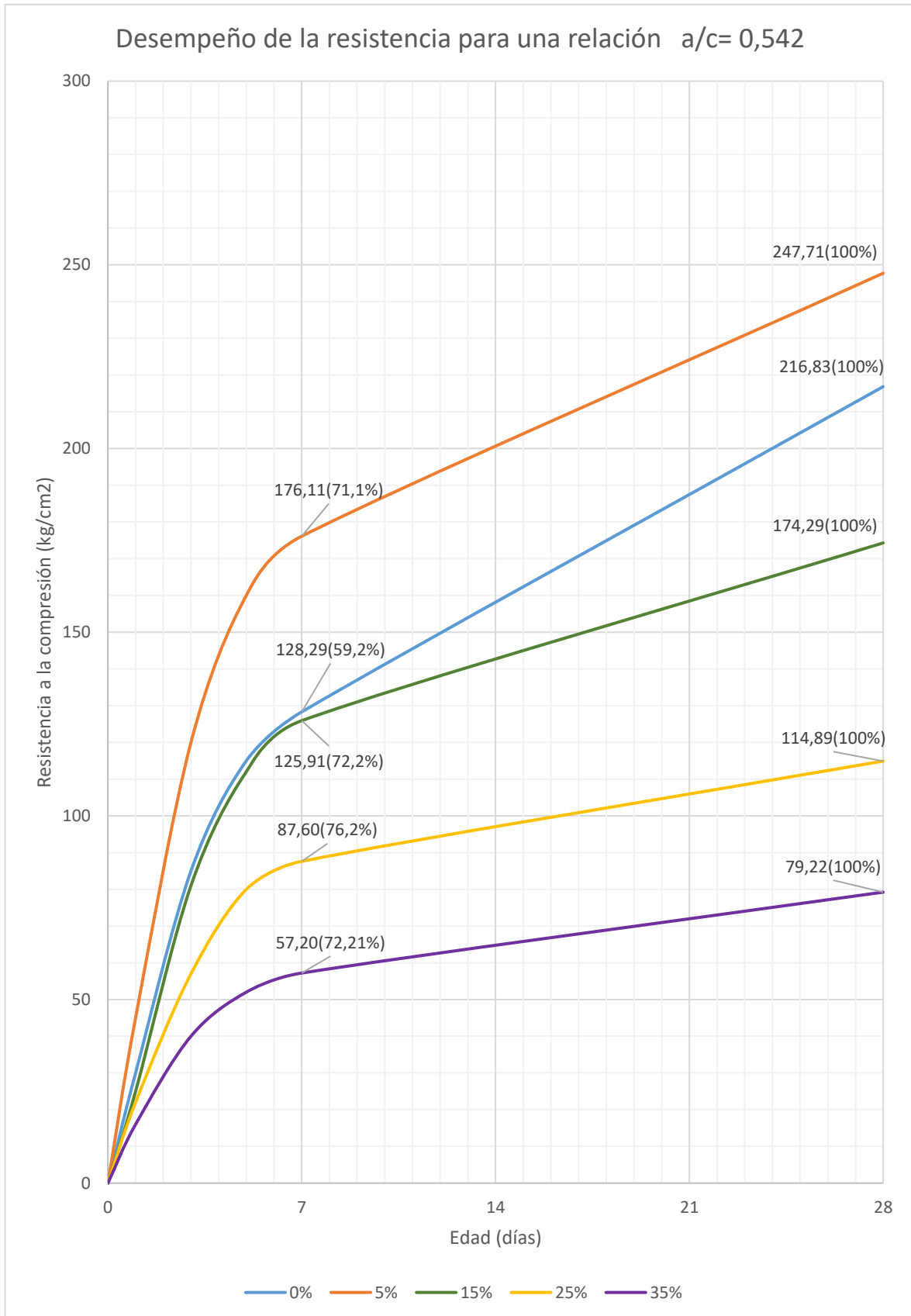
Relación a/c	Porcentaje de PNR	Resistencia a los 7 Días (kg/cm ²)		Resistencia a los 28 Días (kg/cm ²)		Desempeño de la Resistencia característica (%)	
		Promedio	Característico	Promedio	Característico	7 días	28 días
0,542	0	131,51	128,29	223,03	216,83	59,17	100
	5	187,00	176,11	258,67	247,71	71,10	100
	15	138,21	125,91	190,92	174,29	72,24	100
	25	96,48	87,60	125,93	114,89	76,24	100
	35	61,69	57,20	87,30	79,22	72,21	100
0,493	0	163,33	149,05	253,99	248,01	60,10	100
	5	239,89	221,10	293,06	279,46	77,12	100
	15	156,90	144,80	219,07	208,14	69,57	100
	25	114,32	99,42	156,42	141,89	70,07	100
	35	84,15	71,51	111,04	103,35	69,19	100

Fuente: Propia

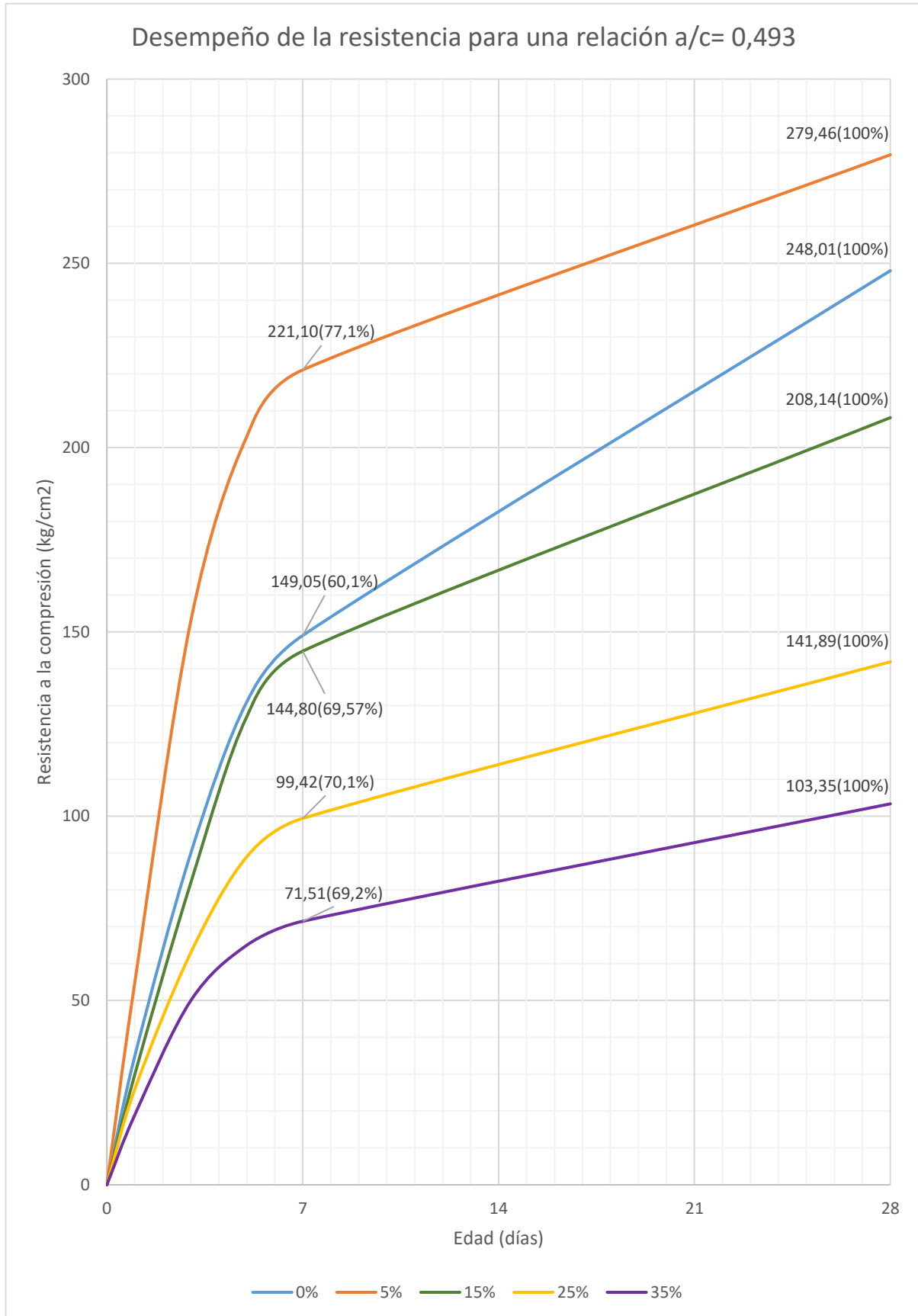
Gráfica 4. Resistencia a la compresión de cilindros a la edad de 7 días



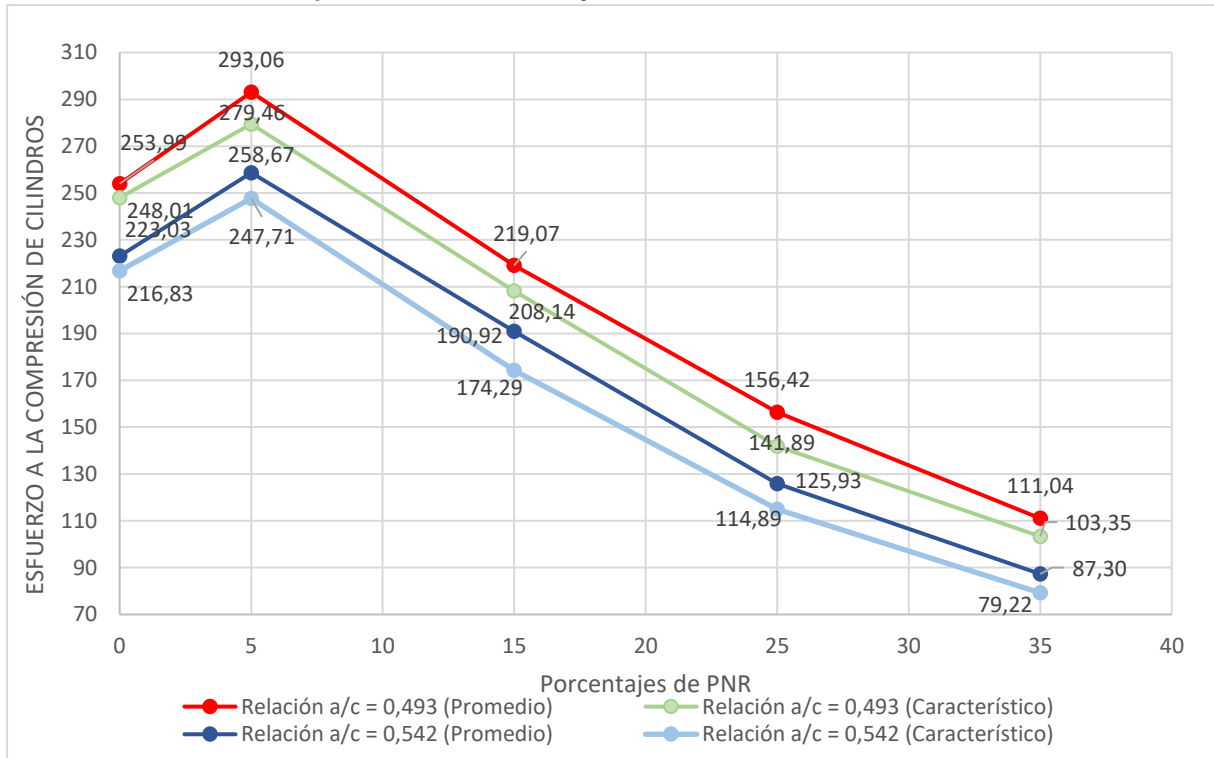
Fuente: Propia

Gráfica 5. Desempeño de las resistencias para muestras con PNR para un diseño cuya relación $a/c = 0,542$ 

Fuente: Propia

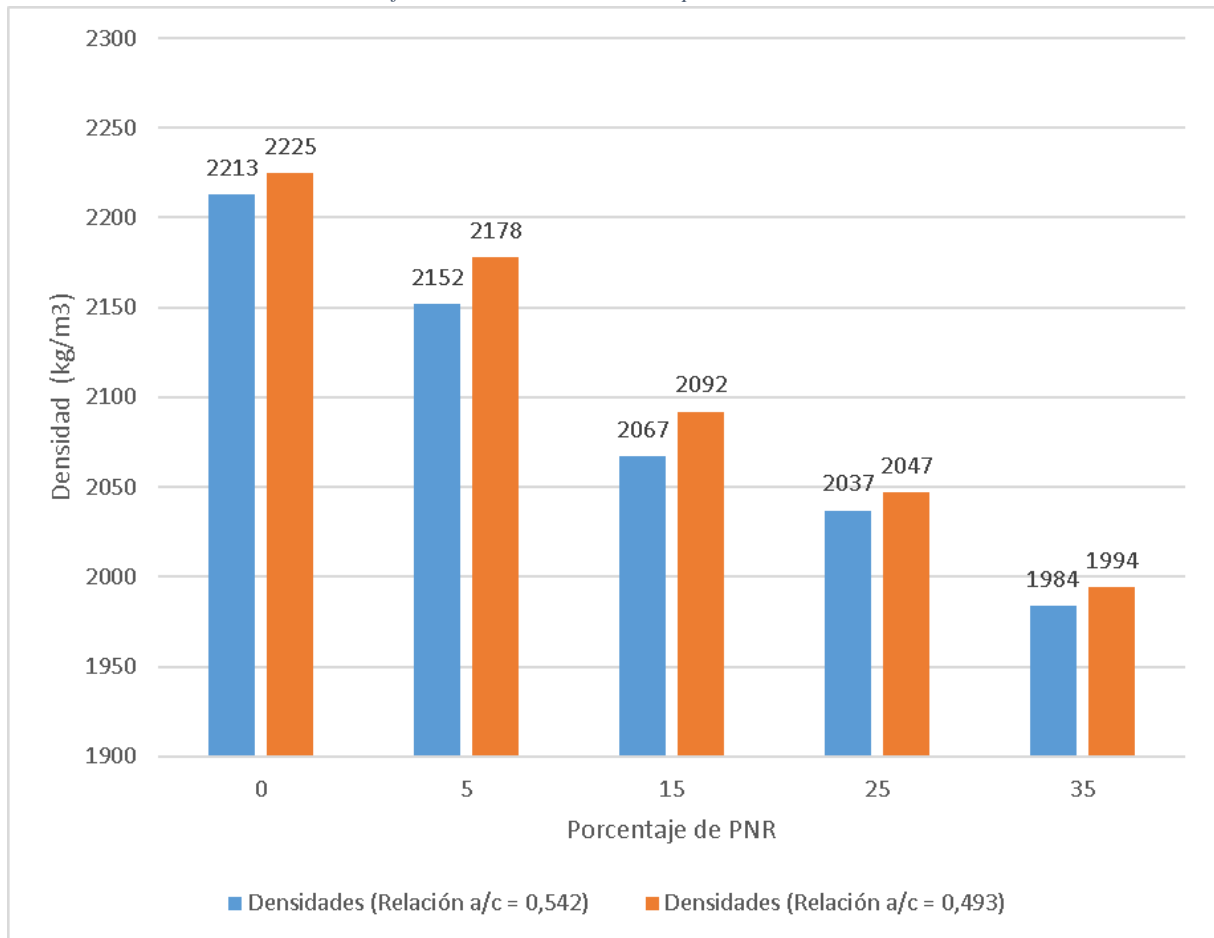
Gráfica 6. Desempeño de las resistencias para muestras con PNR para un diseño cuya relación $a/c=0,493$ 

Gráfica 7. Resistencia a la compresión de cilindros a la edad de 28 días



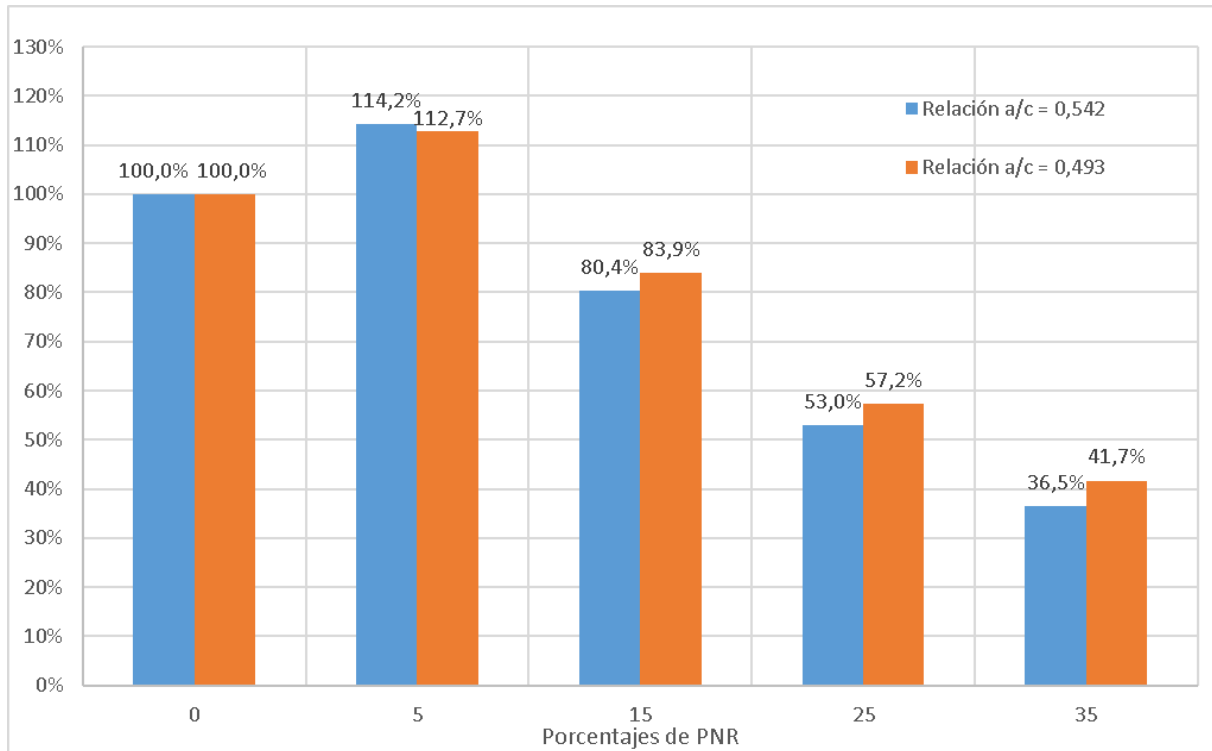
Fuente: Propia

Gráfica 8. Variación de densidad por la adición de PNR



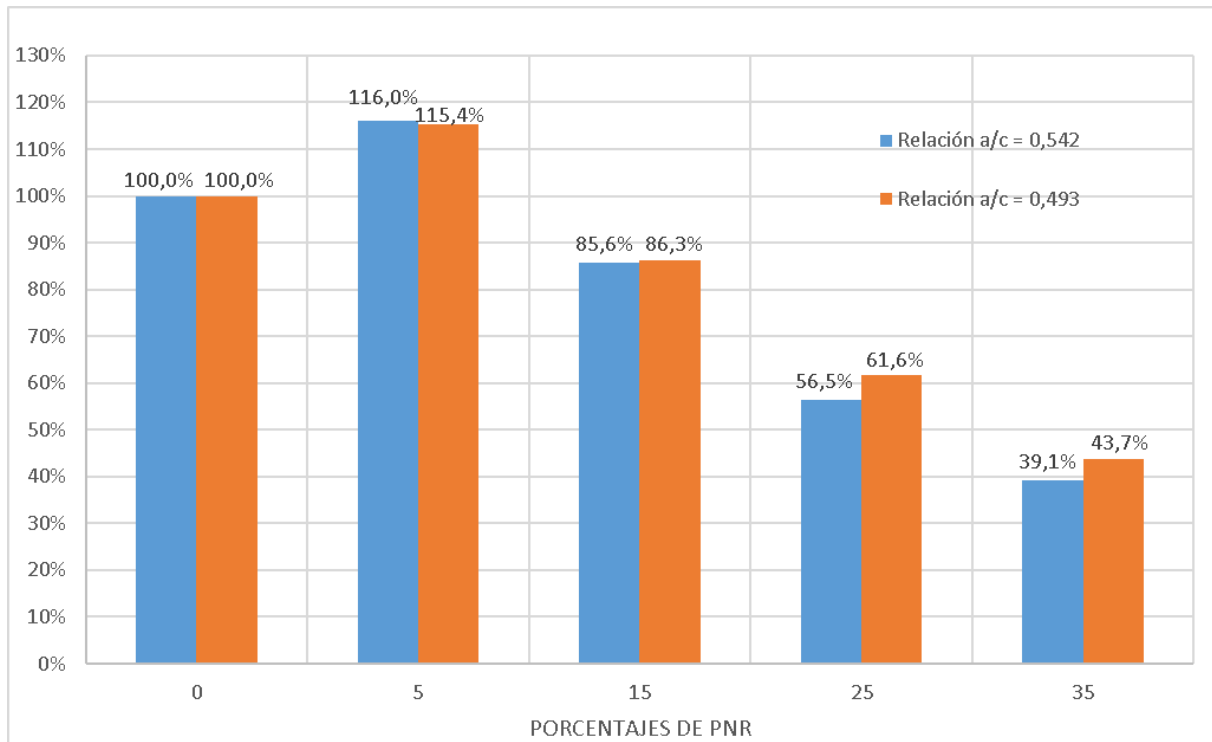
Fuente: Propia

Gráfica 9. Variación de la Resistencia Característica a la compresión por la adición de PNR a la edad de 28 días



Fuente: Propia

Gráfica 10. Variación de la Resistencia promedio a la compresión por la adición de PNR a la edad de 28 días



Fuente: Propia

4.4.2. Resistencia a la flexión de viguetas (ASTM C 78)

4.4.2.1. Muestra Patrón $f'c$ esperado = 210 kg/m² (a/c= 0,542), edad 28 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,542	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	28 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	0%	Fecha:	8/8/2019

Muestra	Tesis C	Tesis B	Tesis A
Fecha de fabricación	10/7/2019	10/7/2019	10/7/2019
Fecha de ensayo	8/8/2019	8/8/2019	8/8/2019
Días curación	28	28	28
Longitud (mm)	537	534	538
Ancho (mm)	153,04	149,95	152,18
Altura (mm)	150,11	149,95	150,17
Longitud de apoyo (mm)	450	450	450
Masa (Kg)	27,56	27,22	27,66
Carga máxima (N)	33000	30500	31093
Resistencia (Kg/cm ²)	43,91	41,51	41,57
Promedio (Kg/cm ²)	42,33		
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	1,37		
Resistencia Característica (Kg/cm ²)	40,49		

4.4.2.2. Muestra alterada con PNR 5%; Relación a/c= 0,542, edad 28 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,542	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	28 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	5%	Fecha:	2/10/2019

Muestra	1	2	3
Fecha de fabricación	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019
Fecha de ensayo	2/10/2019	2/10/2019	2/10/2019
Días curación	28	28	28
Longitud (mm)	535	536	536
Ancho (mm)	151,48	153,12	151,98
Altura (mm)	149,6	150,62	150,96
Longitud de apoyo (mm)	450	450	450
Masa (Kg)	26,365	26,375	26,53
Carga máxima (N)	32014	31320	30182
Resistencia (Kg/cm ²)	43,33	41,37	39,99
Promedio (Kg/cm ²)	41,56		
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	1,68		
Resistencia Característica (Kg/cm ²)	39,30		

4.4.2.3. Muestra alterada con PNR 15%; Relación a/c= 0,542, edad 28 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis;	Checa Marlon
Relación a/c:	0,542	Calculado por:	Quinapallo Luis;	Checa Marlon
Edad:	28 días	Aprobado por:	PUCE	
% PNR:	15%	Fecha:	2/10/2019	

Muestra	1	2	3
Fecha de fabricación	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019
Fecha de ensayo	2/10/2019	2/10/2019	2/10/2019
Días curación	28	28	28
Longitud (mm)	537	536	535
Ancho (mm)	153,6	153,86	152,72
Altura (mm)	149,51	151,85	150,95
Longitud de apoyo (mm)	450	450	450
Masa (Kg)	25,405	25,19	25,19
Carga máxima (N)	27547	25276	25871
Resistencia (Kg/cm ²)	36,82	32,69	34,11
Promedio (Kg/cm ²)	34,54		
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	2,09		
Resistencia Característica (Kg/cm ²)	31,71		

4.4.2.4. Muestra alterada con PNR 25%; Relación a/c= 0,542, edad 28 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis;	Checa Marlon
Relación a/c:	0,542	Calculado por:	Quinapallo Luis;	Checa Marlon
Edad:	28 días	Aprobado por:	PUCE	
% PNR:	25%	Fecha:	3/10/2019	

Muestra	1	2	3
Fecha de fabricación	5/9/2019	5/9/2019	5/9/2019
Fecha de ensayo	3/10/2019	3/10/2019	3/10/2019
Días curación	28	28	28
Longitud (mm)	533	533	533
Ancho (mm)	150,89	152,22	154,24
Altura (mm)	149,71	150,75	150,46
Longitud de apoyo (mm)	450	450	450
Masa (Kg)	25,04	25,29	25,42
Carga máxima (N)	21503	20557	19279
Resistencia (Kg/cm ²)	29,18	27,27	25,34
Promedio (Kg/cm ²)	27,26		
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	1,92		
Resistencia Característica (Kg/cm ²)	24,67		

4.4.2.5. Muestra alterada con PNR 35%; Relación a/c= 0,542, edad 28 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,542	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	28 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	35%	Fecha:	3/10/2019

Muestra	1	2	3
Fecha de fabricación	5/9/2019	5/9/2019	5/9/2019
Fecha de ensayo	3/10/2019	3/10/2019	3/10/2019
Días curación	28	28	28
Longitud (mm)	534	533	538
Ancho (mm)	152,57	151,89	153,96
Altura (mm)	151,42	152,53	152,03
Longitud de apoyo (mm)	450	450	450
Masa (Kg)	24,94	24,84	25,14
Carga máxima (N)	18154	17937	16079
Resistencia (Kg/cm ²)	23,81	23,29	20,73
Promedio (Kg/cm ²)	22,61		
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	1,65		
Resistencia Característica (Kg/cm ²)	20,39		

4.4.2.6. Muestra Patrón f'c esperado = 240 kg/m² (a/c= 0,493), edad 28 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Relación a/c:	0,493	Calculado por:	Quinapallo Luis; Checa Marlon
Edad:	28 días	Aprobado por:	PUCE
% PNR:	0%	Fecha:	10/9/2019

Muestra	240 A	240 B	240 C
Fecha de fabricación	13/8/2019	13/8/2019	13/8/2019
Fecha de ensayo	10/9/2019	10/9/2019	10/9/2019
Días curación	28	28	28
Longitud (mm)	535	535	540
Ancho (mm)	152,66	150,82	152,79
Altura (mm)	149,67	149,92	152,5
Longitud de apoyo (mm)	450	450	450
Masa (Kg)	26,98	27,19	27,35
Carga máxima (N)	34028	36699	36702
Resistencia (Kg/cm ²)	45,66	49,68	47,40
Promedio (Kg/cm ²)	47,58		
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	2,02		
Resistencia Característica (Kg/cm ²)	44,86		

4.4.2.7. Muestra alterada con PNR 5%; Relación a/c= 0,493, edad 28 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis;	Checa Marlon
Relación a/c:	0,493	Calculado por:	Quinapallo Luis;	Checa Marlon
Edad:	28 días	Aprobado por:	PUCE	
% PNR:	5%	Fecha:	3/10/2019	

Muestra	1	2	3
Fecha de fabricación	3/9/2019	3/9/2019	3/9/2019
Fecha de ensayo	1/10/2019	1/10/2019	1/10/2019
Días curación	28	28	28
Longitud (mm)	538	537	538
Ancho (mm)	153,18	153,42	150,72
Altura (mm)	151,88	151	154,35
Longitud de apoyo (mm)	450	450	450
Masa (Kg)	27,145	27,1	26,84
Carga máxima (N)	36410	34120	37878
Resistencia (Kg/cm ²)	47,28	44,76	48,41
Promedio (Kg/cm ²)	46,82		
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	1,87		
Resistencia Característica (Kg/cm ²)	44,29		

4.4.2.8. Muestra alterada con PNR 15%; Relación a/c= 0,493, edad 28 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis;	Checa Marlon
Relación a/c:	0,493	Calculado por:	Quinapallo Luis;	Checa Marlon
Edad:	28 días	Aprobado por:	PUCE	
% PNR:	15%	Fecha:	1/10/2019	

Muestra	1	2	3
Fecha de fabricación	3/9/2019	3/9/2019	3/9/2019
Fecha de ensayo	1/10/2019	1/10/2019	1/10/2019
Días curación	28	28	28
Longitud (mm)	535	535	537
Ancho (mm)	152,77	150,86	152,01
Altura (mm)	151,25	151,6	149,78
Longitud de apoyo (mm)	450	450	450
Masa (Kg)	25,375	25,59	25,66
Carga máxima (N)	30061	32350	32494
Resistencia (Kg/cm ²)	39,47	42,81	43,72
Promedio (Kg/cm ²)	42,00		
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	2,24		
Resistencia Característica (Kg/cm ²)	38,98		

4.4.2.9. Muestra alterada con PNR 25%; Relación a/c= 0,493, edad 28 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis;	Checa Marlon
Relación a/c:	0,493	Calculado por:	Quinapallo Luis;	Checa Marlon
Edad:	28 días	Aprobado por:	PUCE	
% PNR:	25%	Fecha:	2/10/2019	

Muestra	1	2	3
Fecha de fabricación	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019
Fecha de ensayo	2/10/2019	2/10/2019	2/10/2019
Días curación	28	28	28
Longitud (mm)	538	535	560
Ancho (mm)	152,57	152,74	154,49
Altura (mm)	152,53	152,8	153
Longitud de apoyo (mm)	450	450	450
Masa (Kg)	25,025	24,625	26,41
Carga máxima (N)	24007	27704	27995
Resistencia (Kg/cm ²)	31,03	35,65	35,52
Promedio (Kg/cm ²)	34,07		
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	2,63		
Resistencia Característica (Kg/cm ²)	30,52		

4.4.2.10. Muestra alterada con PNR 35%; Relación a/c= 0,493, edad 28 días

Obra:	Tesis	Ensayado por:	Quinapallo Luis;	Checa Marlon
Relación a/c:	0,493	Calculado por:	Quinapallo Luis;	Checa Marlon
Edad:	28 días	Aprobado por:	PUCE	
% PNR:	35%	Fecha:	2/10/2019	

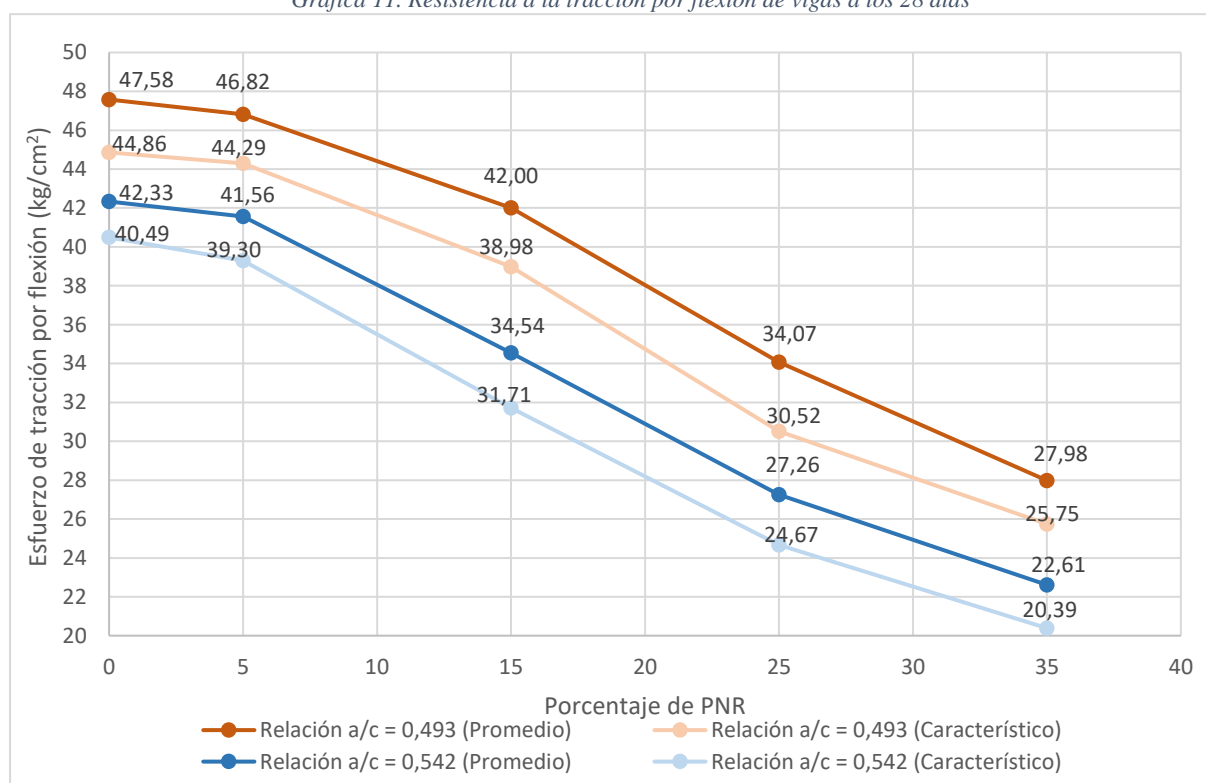
Muestra	1	2	3
Fecha de fabricación	4/9/2019	4/9/2019	4/9/2019
Fecha de ensayo	2/10/2019	2/10/2019	2/10/2019
Días curación	28	28	28
Longitud (mm)	534	536	560
Ancho (mm)	150,94	152,52	152,52
Altura (mm)	151,1	153,55	152,9
Longitud de apoyo (mm)	450	450	450
Masa (Kg)	23,965	24,28	25,72
Carga máxima (N)	21798	20432	22416
Resistencia (Kg/cm ²)	29,03	26,07	28,85
Promedio (Kg/cm ²)	27,98		
Desviación Estándar (Kg/cm ²)	1,66		
Resistencia Característica (Kg/cm ²)	25,75		

Tabla 50. Resumen de resistencias de tracción por flexión de viguetas y comparación con esfuerzos a compresión

Relación a/c	Porcentaje de PNR	Flexión de viguetas (Kg/cm ²)		Compresión de cilindros (Kg/cm ²)		Relación Flexión/Compresión (%)	
		Promedio	Característico	Promedio	Característico	Promedio	Característico
0,542	0	42,33	40,49	223,03	216,83	18,98	18,67
	5	41,56	39,30	258,67	247,71	16,07	15,86
	15	34,54	31,71	190,92	174,29	18,09	18,20
	25	27,26	24,67	125,93	114,89	21,65	21,47
	35	22,61	20,39	87,30	79,22	25,90	25,74
0,493	0	47,58	44,86	253,99	248,01	18,73	18,09
	5	46,82	44,29	293,06	279,46	15,98	15,85
	15	42,00	38,98	219,07	208,14	19,17	18,73
	25	34,07	30,52	156,42	141,89	21,78	21,51
	35	27,98	25,75	111,04	103,35	25,20	24,91

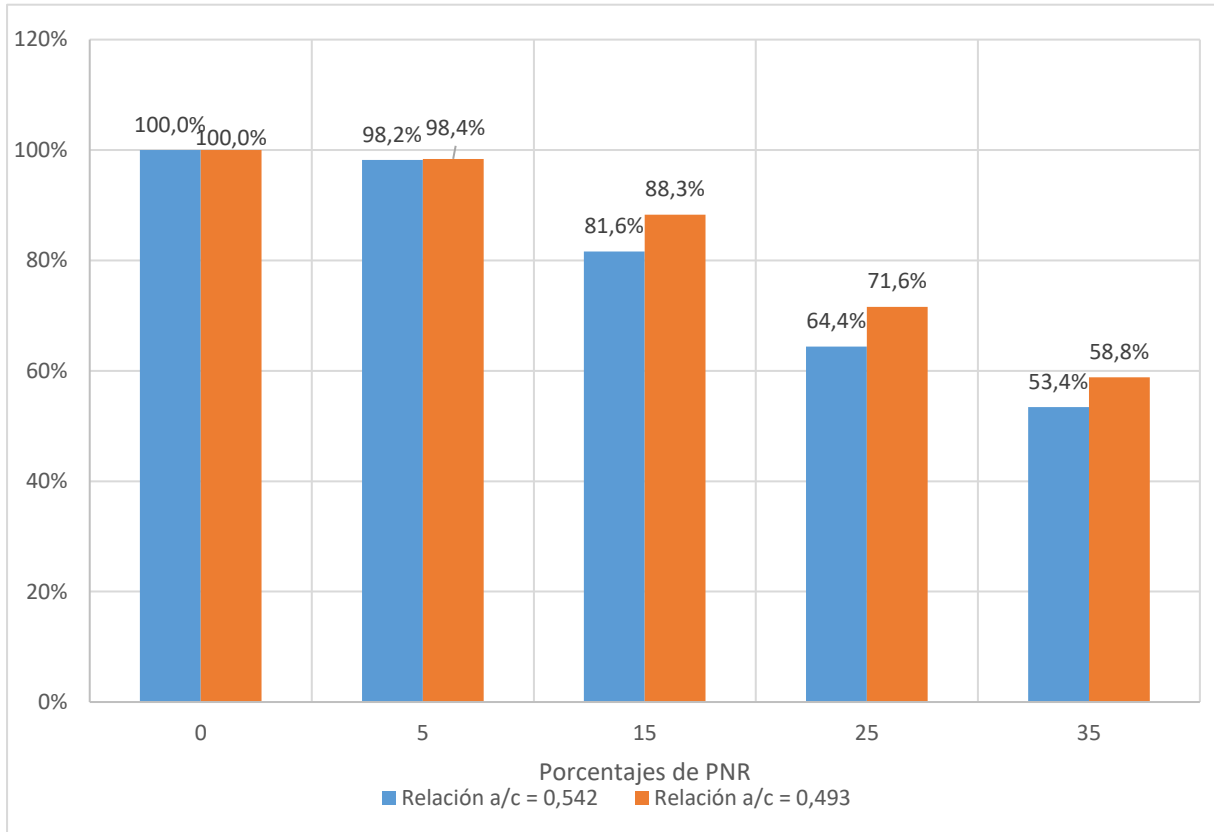
Fuente: Propia

Gráfica 11. Resistencia a la tracción por flexión de vigas a los 28 días



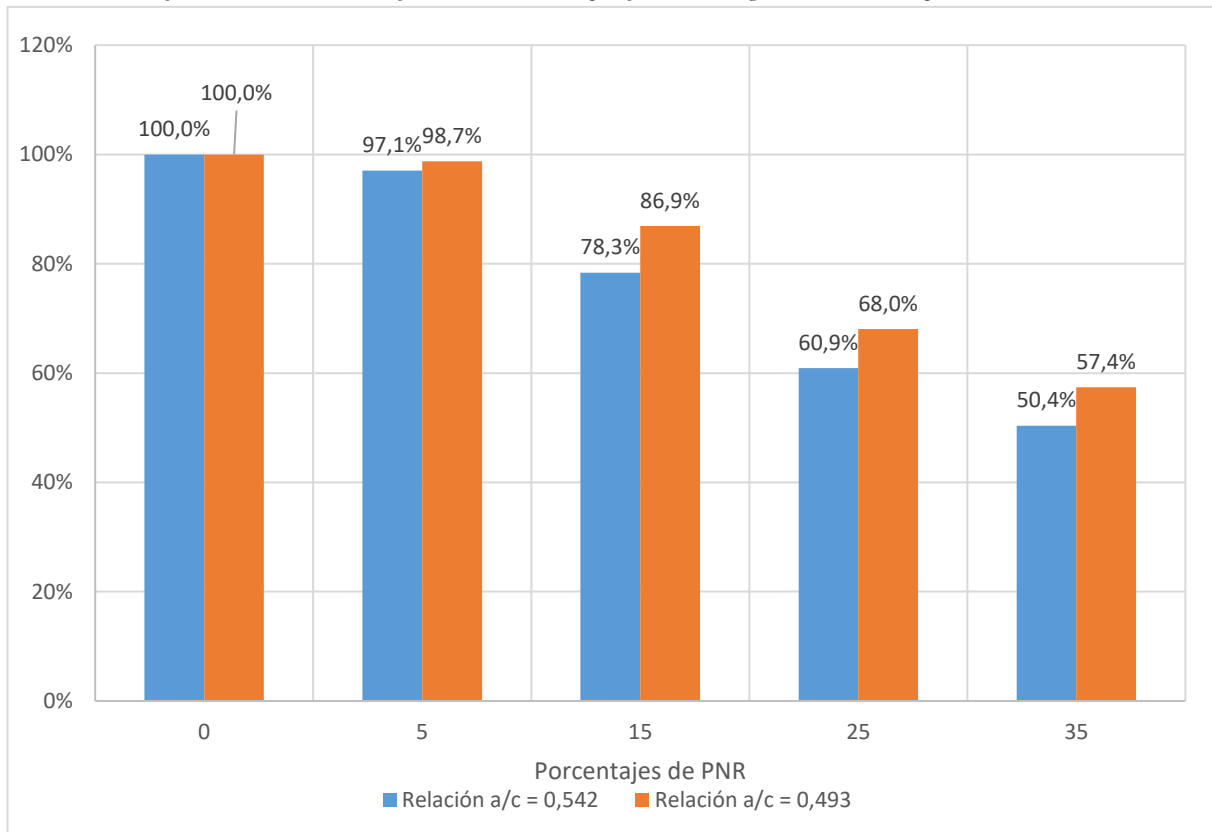
Fuente: Propia

Gráfica 12. Variación de Esfuerzos de tracción por flexión de vigas promedio por la adición de PNR



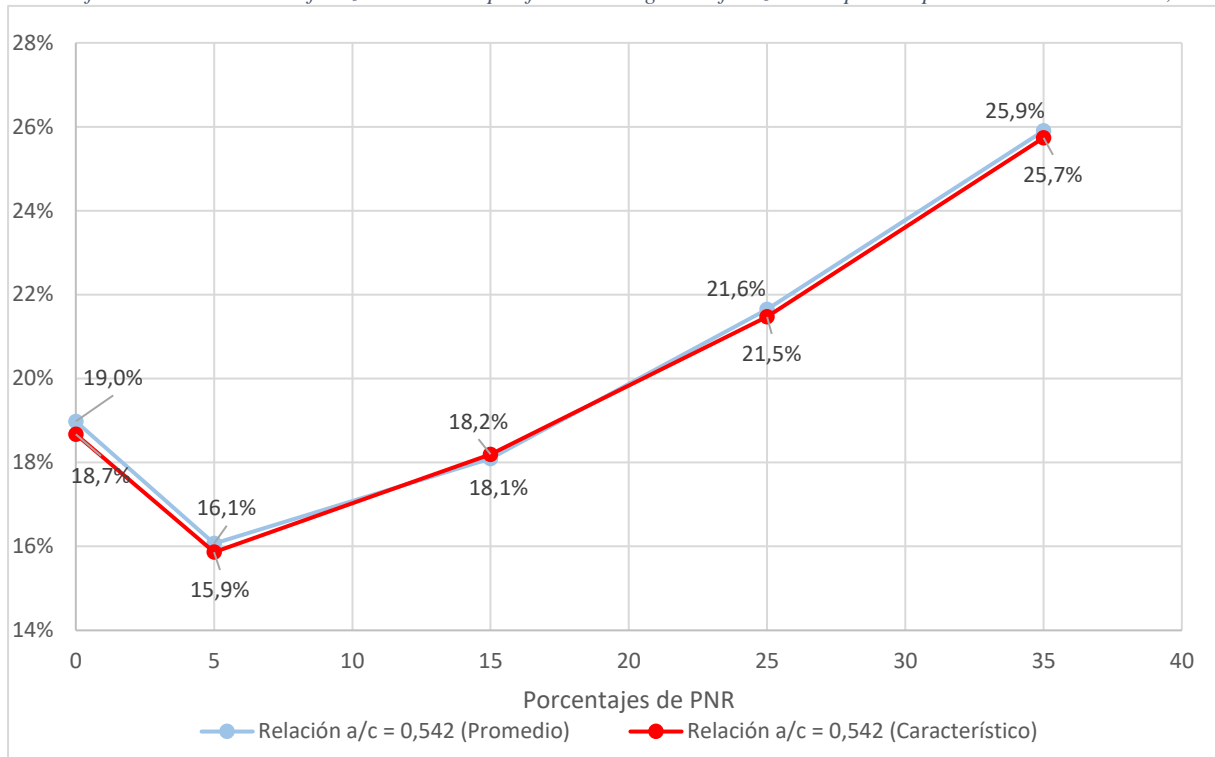
Fuente: Propia

Gráfica 13. Variación de Esfuerzos de tracción por flexión de vigas característica por la adición de PNR



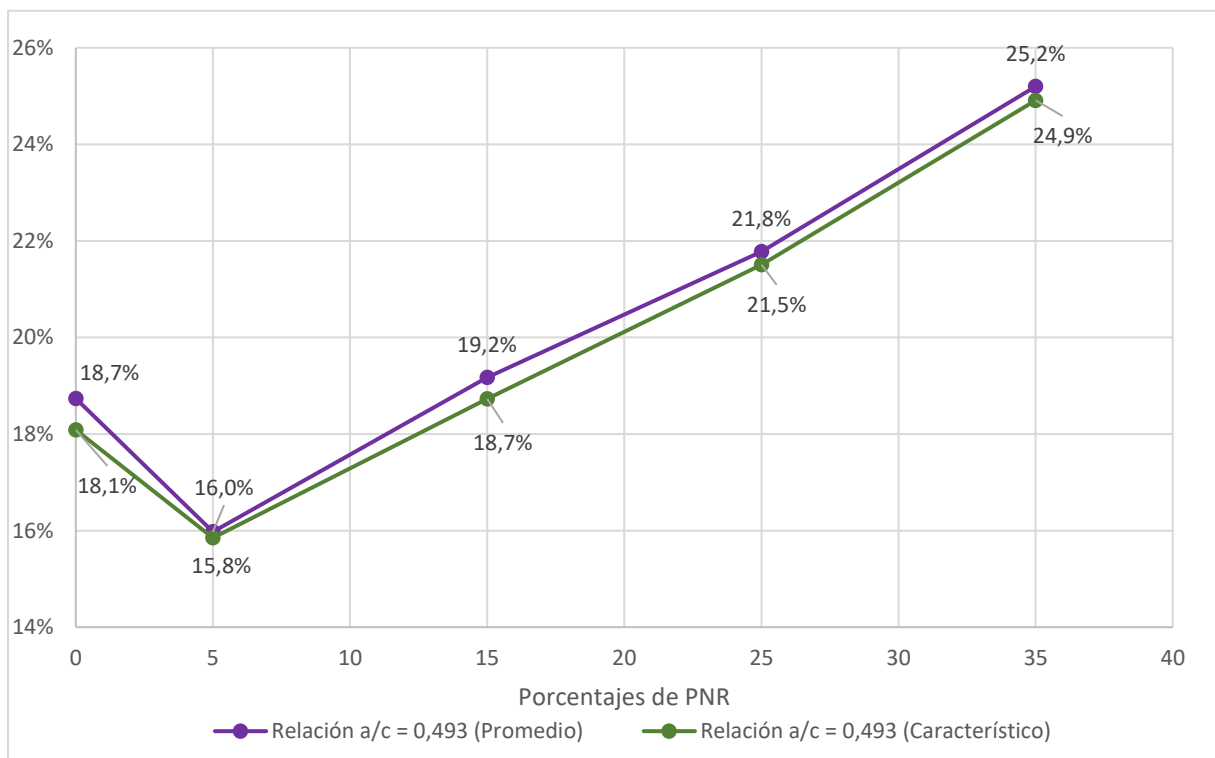
Fuente: Propia

Gráfica 14. Relación de Esfuerzos a tracción por flexión de vigas / Esfuerzo a compresión para una relación a/c= 0,542



Fuente: Propia

Gráfica 15. Relación de Esfuerzos a tracción por flexión de vigas / Esfuerzo a compresión para una relación a/c= 0,493



Fuente: Propia

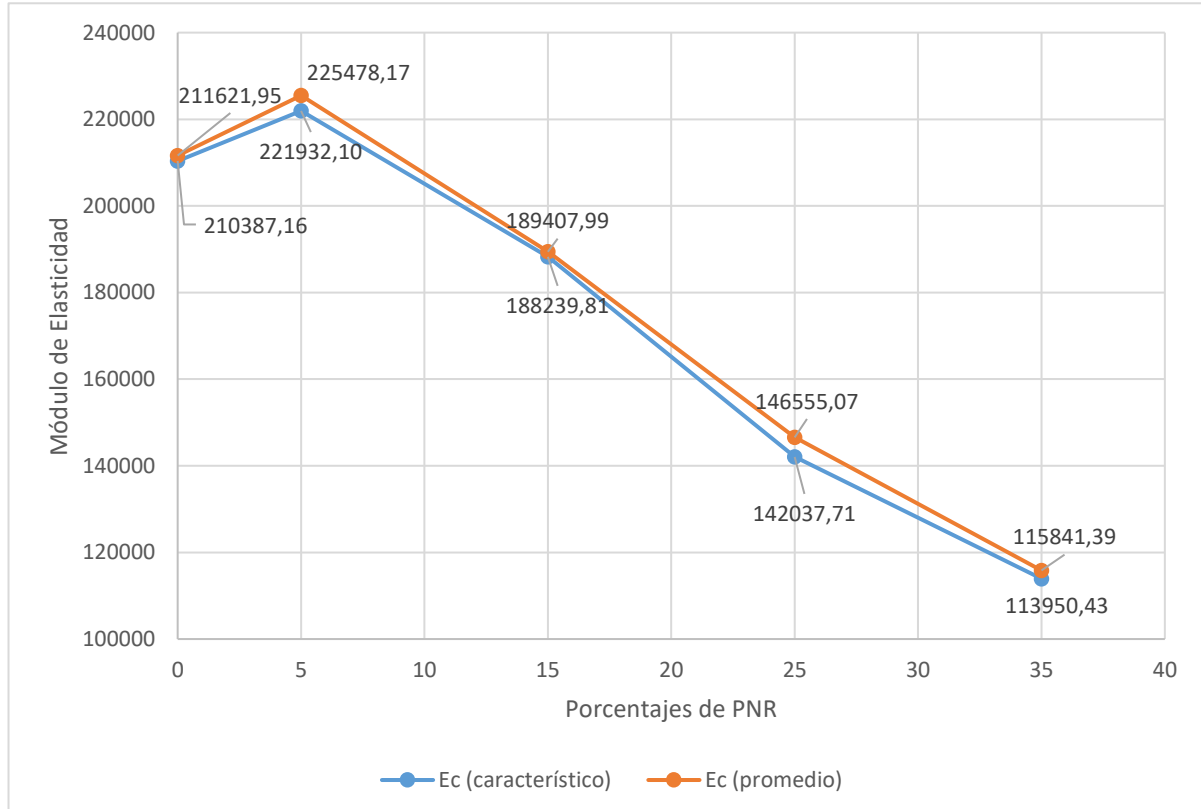
4.4.3. Determinación del Módulo de Elasticidad (ASTM C 469)

Tabla 51. Resumen de resultados de Módulo de Elasticidad calculados usando muestras obtenidas en laboratorio

Relación a/c	Porcentaje de PNR	Módulo 1 (Kg/cm ²)	Módulo 2 (Kg/cm ²)	Módulo 3 (Kg/cm ²)	Promedio (Kg/cm ²)	Desv. estándar (Kg/cm ²)	Ec Característico (Kg/cm ²)
0,542	0	211259,63	210943,95	212662,26	211621,95	914,66	210387,16
	5	228187,35	225304,63	222942,52	225478,17	2626,72	221932,10
	15	188592,96	189314,93	190316,08	189407,99	865,32	188239,81
	25	146946,46	149688,35	143030,39	146555,07	3346,19	142037,71
	35	117338,88	115621,902	114563,38	115841,39	1400,71	113950,43
0,493	0	223076,19	228908,121	223821,03	225268,45	3173,97	220983,58
	5	236819,48	234183,27	231430,954	234144,57	2694,47	230507,03
	15	187989,494	193228,401	192846,53	191354,81	2920,70	187411,87
	25	153422,627	151776,98	155098,57	153432,73	1660,82	151190,62
	35	122867,76	124314,08	123085,35	123422,40	779,85	122369,60

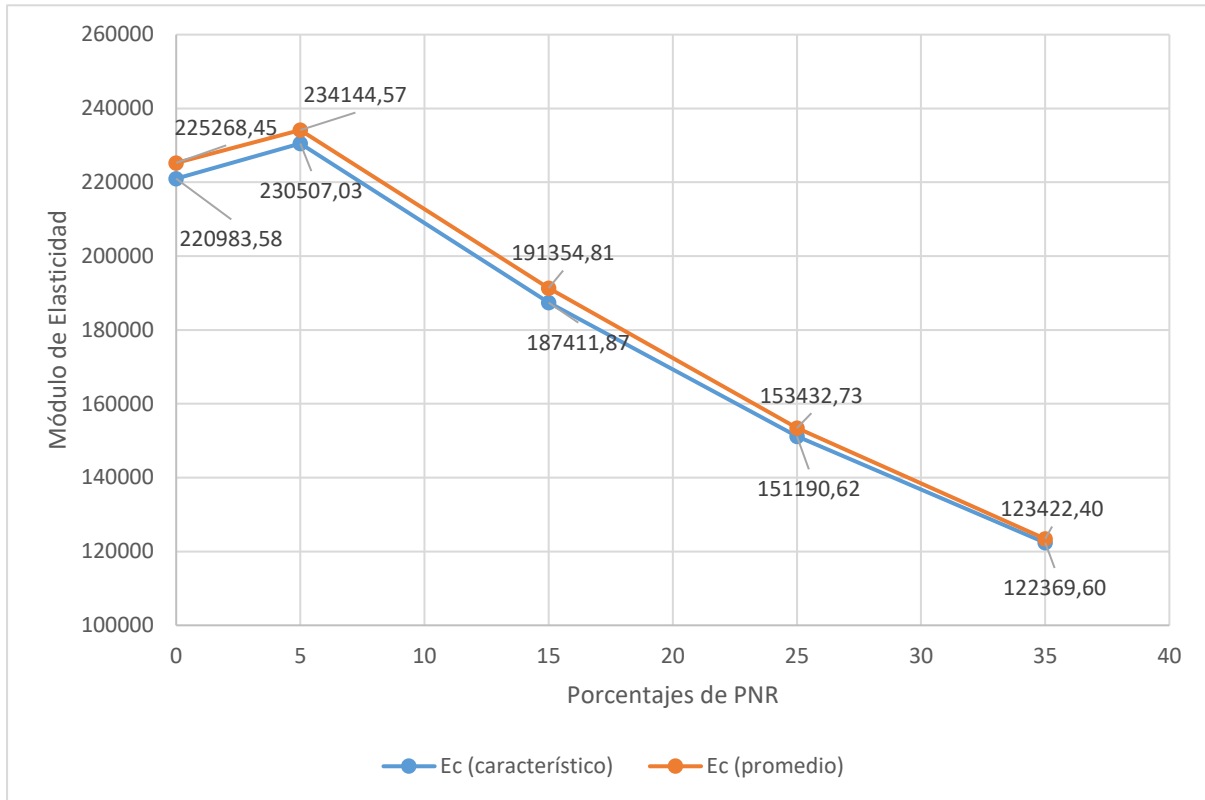
Fuente: Propia

Gráfica 16. Módulo de elasticidad para una relación a/c = 0,542



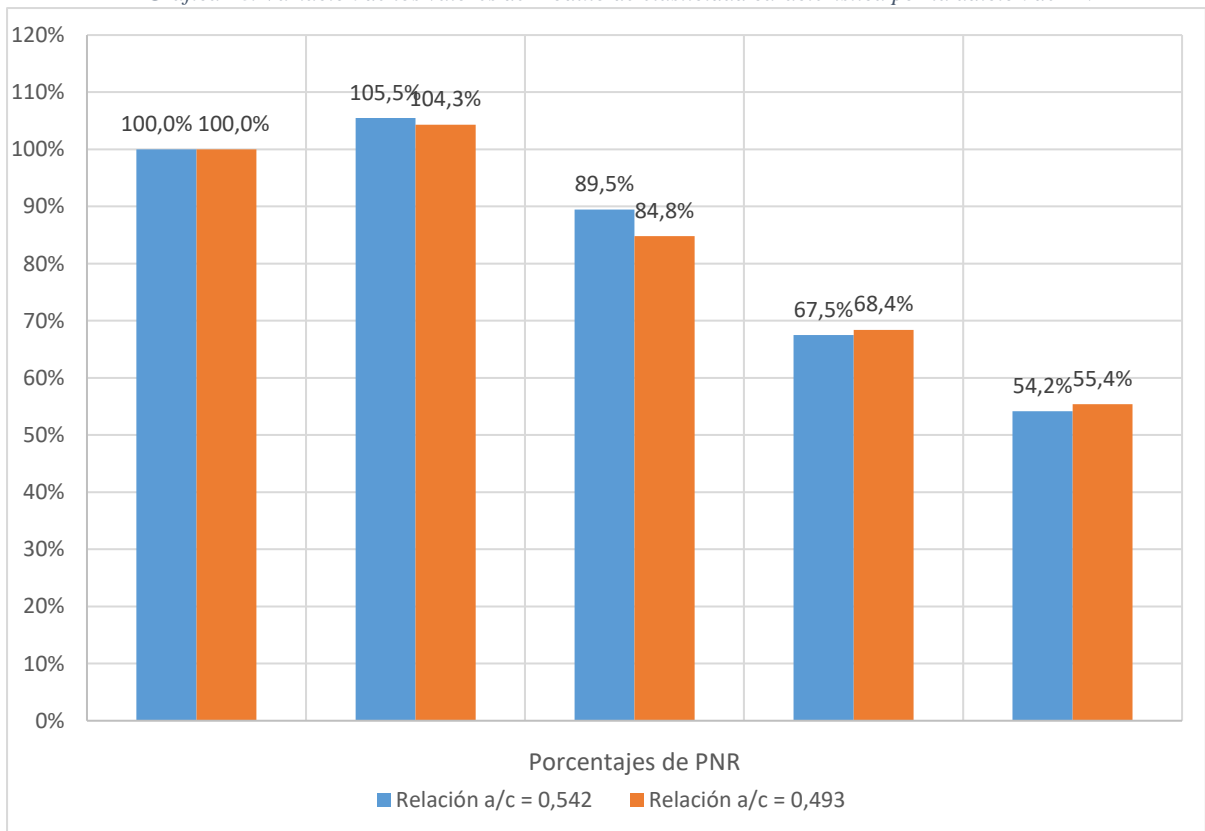
Fuente: Propia

Gráfica 17. Módulo de elasticidad para una relación a/c = 0,493



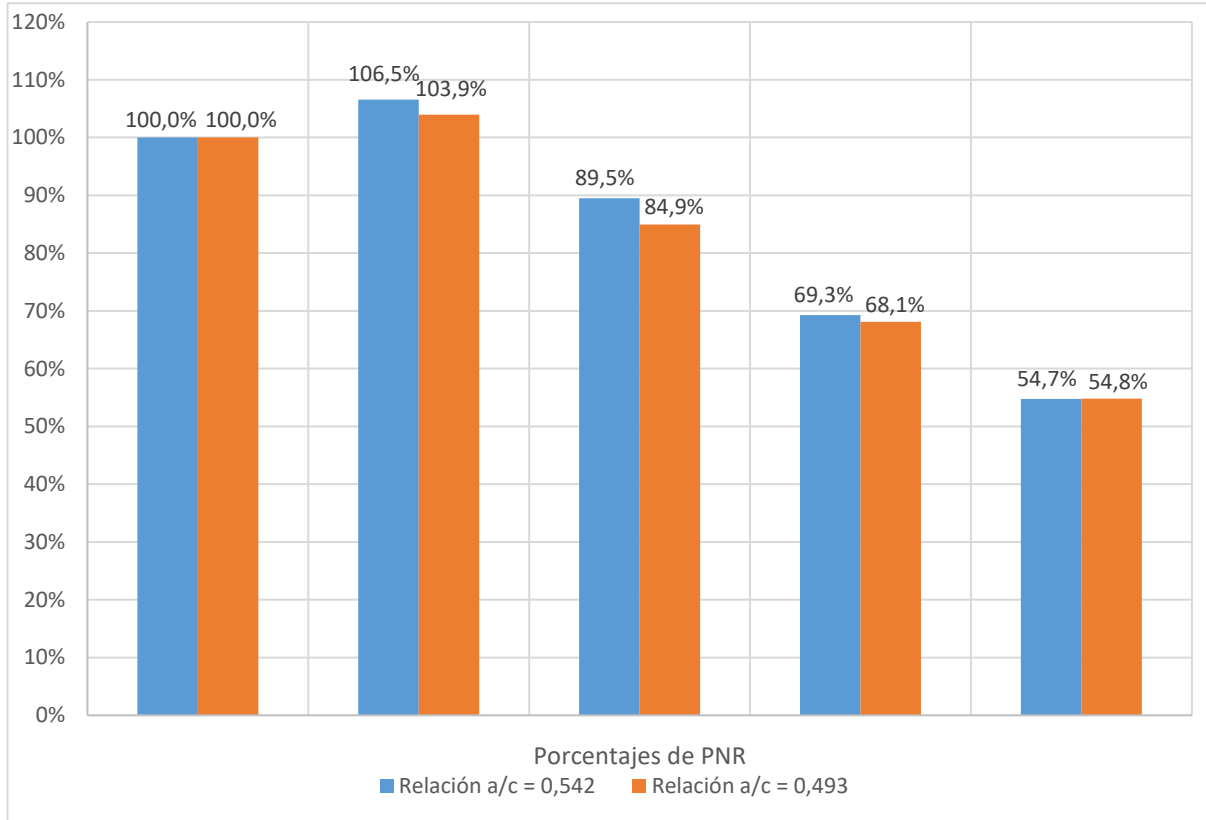
Fuente: Propia

Gráfica 18. Variación de los valores de Módulo de elasticidad característica por la adición de PNR



Fuente: Propia

Gráfica 19. Cambio de los valores de Módulo de elasticidad promedio por la adición de PNR

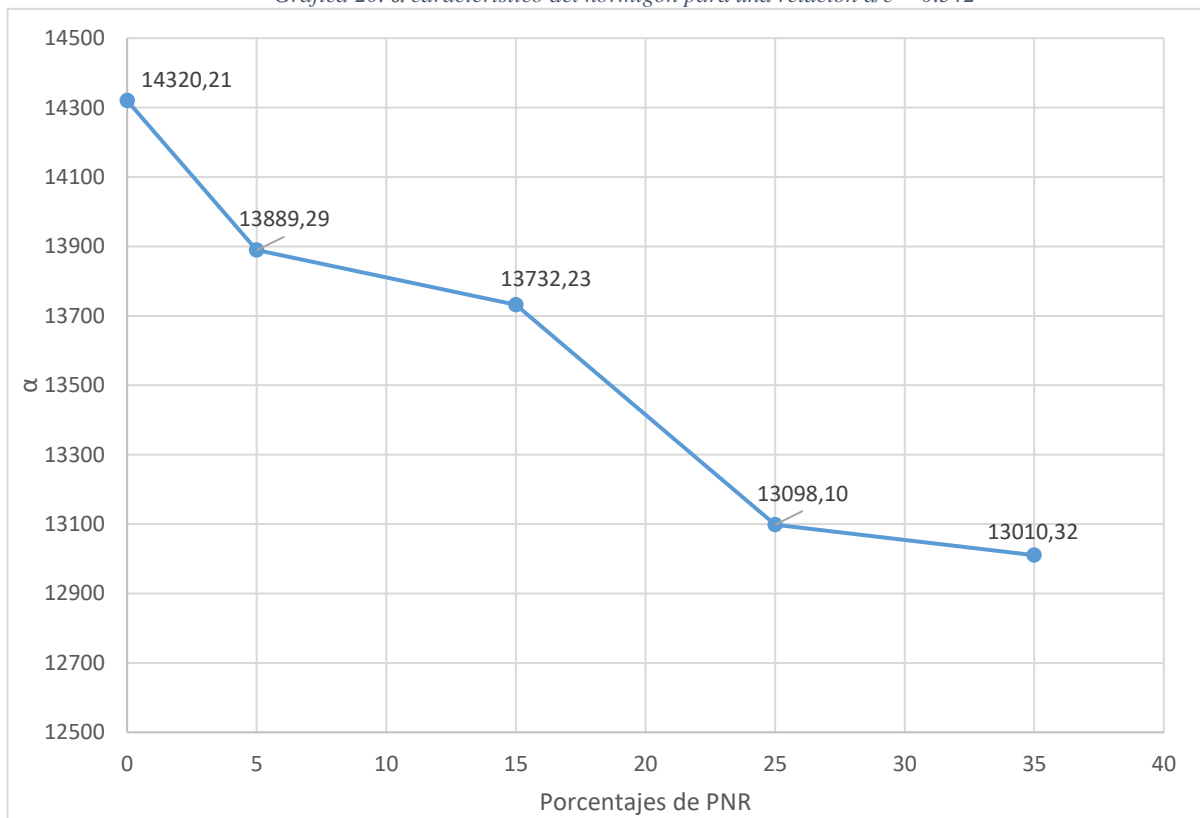


Fuente: Propia

Tabla 52. Resumen de valores de α calculados usando muestras obtenidas en laboratorio

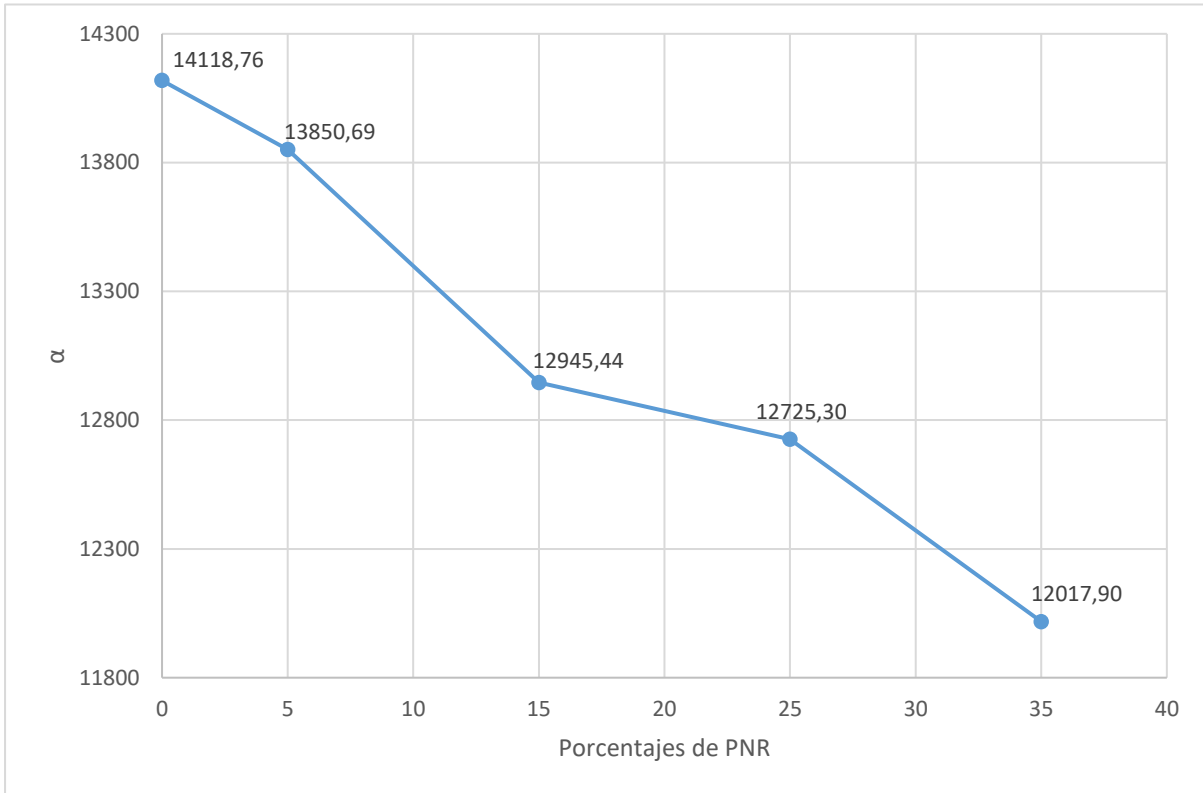
Relación a/c	Porcentaje de PNR	R 1 (Kg/cm ²)	R 2 (Kg/cm ²)	R 3 (Kg/cm ²)	Promedio (Kg/cm ²)	Desviación estándar (Kg/cm ²)	Resistencia característica (Kg/cm ²)	α característico
0,542	0	220,30	223,30	216,90	220,17	3,20	215,84	14320,21
	5	259,20	257,90	255,80	257,63	1,72	255,32	13889,29
	15	189,20	192,70	196,40	192,77	3,60	187,91	13732,23
	25	122,10	131,20	121,50	124,93	5,44	117,60	13098,10
	35	83,30	89,50	78,90	83,90	5,33	76,71	13010,32
0,493	0	256,10	256,00	246,10	252,73	5,74	244,98	14118,76
	5	279,60	301,70	303,50	294,93	13,31	276,97	13850,69
	15	221,40	229,40	212,40	221,07	8,50	209,59	12945,44
	25	148,20	168,10	150,90	155,73	10,79	141,16	12725,30
	35	108,90	104,20	108,70	107,27	2,66	103,68	12017,90

Fuente: Propia

Gráfica 20. α característico del hormigón para una relación a/c = 0.542

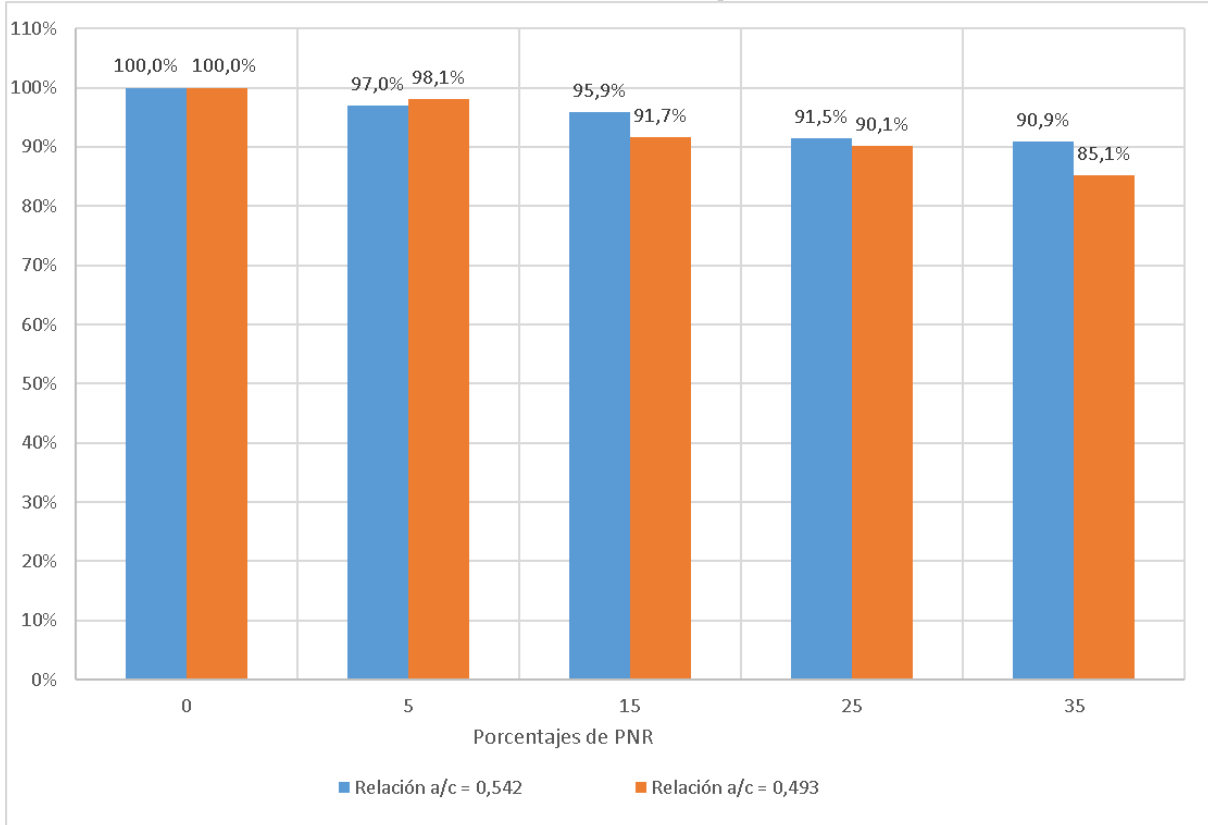
Fuente: Propia

Gráfica 21. α característico del hormigón para una relación a/c = 0.493



Fuente: Propia

Gráfica 22. Variación de los valores de α por la adición de PNR

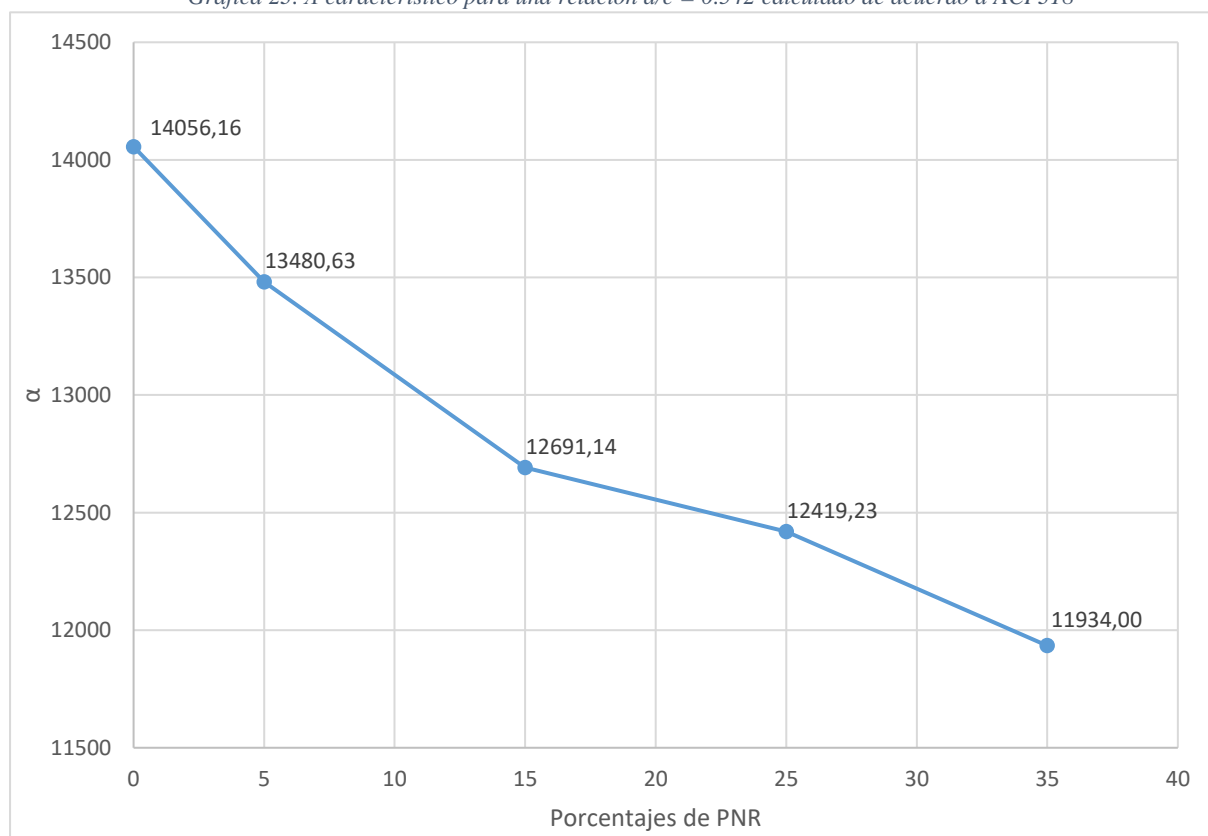


Fuente: Propia

Tabla 53. Resumen de valores de α calculados de acuerdo con los criterios de la ACI 318(α característico)

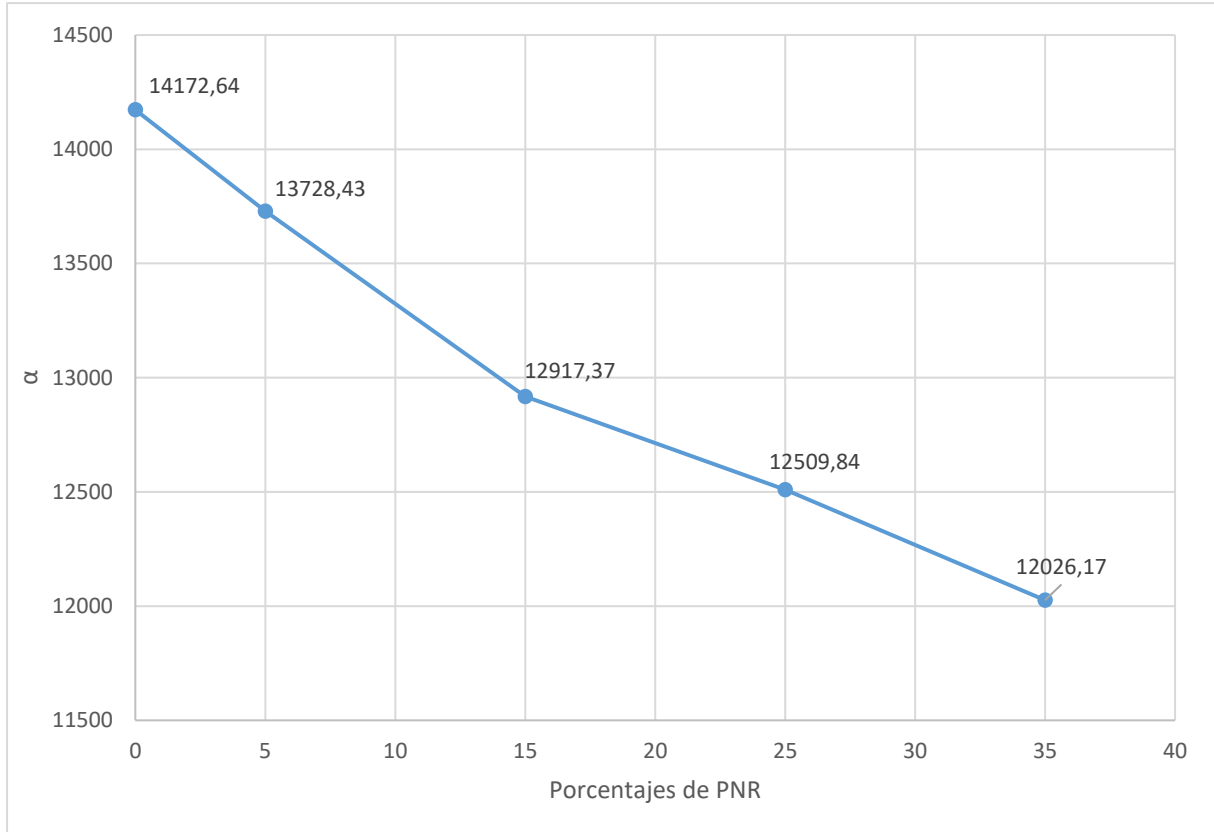
Relación a/c	Porcentaje de PNR	W1 (tn/m ³)	W2 (tn/m ³)	W3 (tn/m ³)	W4 (tn/m ³)	W5 (tn/m ³)	Desviación estándar (tn/m ³)	Característico (tn/m ³)	α ACI característico
0,542	0	2,215	2,257	2,258	2,257	2,222	0,021	2,213	14056,16
	5	2,195	2,228	2,189	2,229	2,147	0,034	2,152	13480,63
	15	2,164	2,125	2,142	2,156	2,052	0,045	2,067	12691,14
	25	2,095	2,072	2,053	2,04	2,068	0,021	2,038	12419,23
	35	2,056	2,045	2,016	2,037	1,977	0,031	1,984	11934,00
0,493	0	2,226	2,237	2,227	2,235	2,236	0,005	2,225	14172,64
	5	2,181	2,19	2,191	2,179	2,187	0,005	2,178	13728,43
	15	2,093	2,106	2,111	2,095	2,108	0,008	2,092	12917,37
	25	2,06	2,048	2,056	2,064	2,052	0,006	2,047	12509,84
	35	2,011	2,006	2,001	2,027	2,043	0,017	1,994	12026,17

Fuente: Propia

Gráfica 23. α característico para una relación a/c = 0.542 calculado de acuerdo a ACI 318

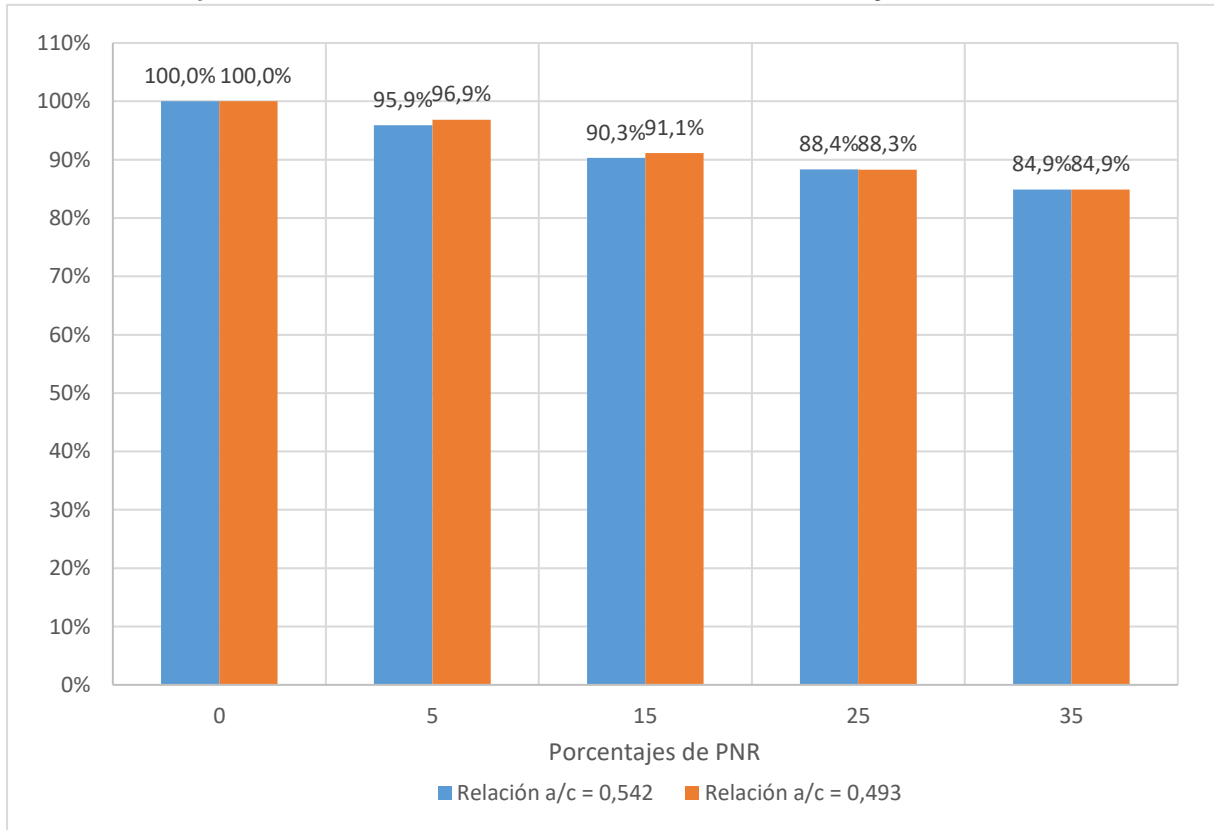
Fuente: Propia

Gráfica 24. Característico para una relación a/c = 0.493 calculado de acuerdo con ACI 318



Fuente: Propia

Gráfica 25. Variación de los valores de alpha calculados de acuerdo con ACI por la adición de PNR



Fuente: Propia

5. Conclusiones y Recomendaciones

5.1. Conclusiones

Tabla 54. Resumen de propiedades y cumplimiento de los insumos

AGREGADO FINO					
PROPIEDADES	NORMATIVA	VALOR	UNIDAD	PARÁMETRO	OBSERVACIÓN
Granulometría	ASTM C 136	25,83 DENTRO DE ESPECIFICACIÓN			NO CUMPLE
Material más fino que pasa el tamiz N° 200	ASTM C 117	11,6	%	NO MAYOR A 7%	NO CUMPLE
Contenido orgánico	ASTM C 40	<500	PPM	MENOR O IGUAL A 500 PPM	CUMPLE
Gravedad específica	ASTM C 127	2,47	-	-	-
Absorción	ASTM C 70	6	%	-	-
Peso unitario suelto	ASTM C 29	1576,6	kg/m ³	-	-
Peso unitario compactado	ASTM C 29	1817,91	kg/m ³	-	-
Porcentaje de vacíos	ASTM C 29	29,76	%	-	-
Desgaste a los sulfatos	ASTM C 88	5,61	%	NO MAYOR A 10%	CUMPLE
Terrones de arcilla	ASTM C 33	3	%	NO MAYOR A 3 %	CUMPLE
Módulo de finura	ASTM C 136	3,2	-	2,3 a 3,2	CUMPLE
AGREGADO GRUESO					
Granulometría	ASTM C 136	2,85 DENTRO DE ESPECIFICACIÓN			NO CUMPLE
Resistencia a la Abrasión	ASTM C 131	28,27	%	NO MAYOR A 50%	CUMPLE
Gravedad Específica	ASTM C 127	2,57	-	-	-
Absorción	ASTM C 70	2,94	%	-	-
Peso unitario suelto	ASTM C 29	1361,73	kg/m ³	-	-
Peso unitario compactado	ASTM C 29	1472,96	kg/m ³	-	-
Porcentaje de vacíos	ASTM C 29	42,8	%	-	-
Desgaste a los sulfatos	ASTM C 88	2,5	%	NO MAYOR A 15 %	CUMPLE
Equivalente de arena	ASTM D 2419	83,5	%	MAYOR O IGUAL A 90	CUMPLE
Terrones de arcilla	ASTM C 33	2	%	NO MAYOR A 3 %	CUMPLE
Módulo de finura	ASTM C 136	6,12	-	-	CUMPLE
CEMENTO					
Gravedad específica	ASTM C 188	2,9	-	-	-
Finura Blaine	ASTM C 204	316	m ² /kg	260 a 430	CUMPLE
Tiempo de fraguado Vicat	ASTM C 1005	111	min	45 a 420 minutos	CUMPLE
Expansión en el Autoclave	ASTM C 151	0,76	%	Límite Máximo = 0,8%	CUMPLE
Consistencia normal del cemento	ASTM C 187	28,2	%	-	-
Resistencia a la compresión de morteros Normalizados	ASTM C 109	176, 255 y 278	kg/cm ²	Mayor a 130, 200 y 250	CUMPLE

Fuente: Propia

- Después de realizados los ensayos de laboratorio, se pudo establecer que los agregados (fino y grueso) y el cemento (Holcim tipo GU), cumplen con los estándares especificados en las normativas ASTM C 33 y ASTM C 595 para la fabricación de hormigones, excepto los ensayos de granulometría y material más fino que pasa el tamiz N° 200 como se observa en la tabla 54; sin embargo, este desfase fue corregido en los procesos de proporcionamiento de las mezclas de hormigón.
- Las propiedades del polvo de neumático reciclado obtenidas en laboratorio fueron las siguientes:

Tabla 55. Resumen de las propiedades del PNR

POLVO DE NEUMÁTICO RECICLADO			
PROPIEDADES	NORMATIVA	VALOR OBTENIDO	UNIDAD
Contenido de humedad	ASTM D 1864	0,09	%
Partículas ferrosas	INEN 2680	0,089	%
Módulo de finura	ASTM D 5644	1,81	-
Granulometría	ASTM D 5644	2,3 a 0,074	mm
Absorción	ASTM C 70	7	%
Porcentaje de fibra	INEN 2680	0,16	%
Gravedad específica	INEN 2680	1,17	-

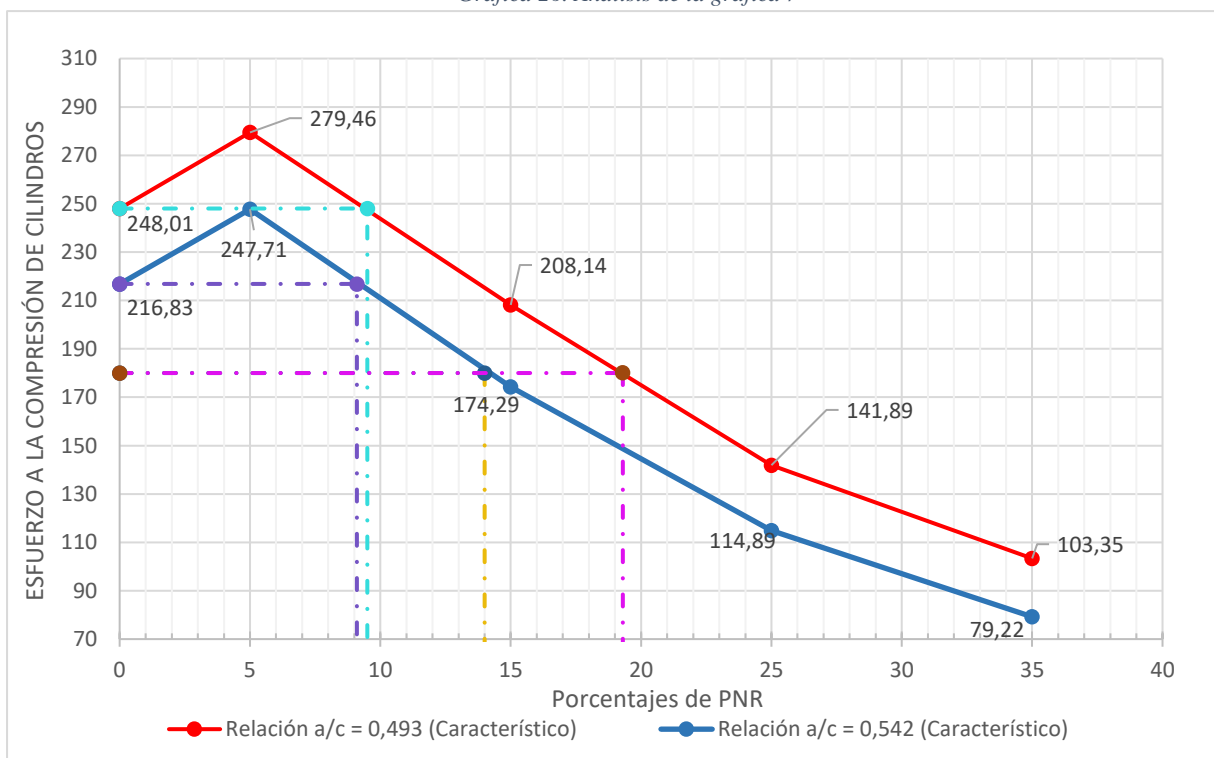
Fuente: Propia

- Las muestras hormigón normal con una relación $a/c = 0,542$ y $a/c = 0,493$, presentaron un desarrollo de resistencia a los 7 días de aproximadamente el 60% con respecto al 100% de la resistencia que se logra a los 28 días, como se observa en las gráficas 5 y 6; por el contrario, las muestras alteradas con PNR desarrollaron aproximadamente un valor promedio del 74 % con respecto la resistencia lograda a los 28 días.
- Como se observa en las gráficas 7 y 9, las resistencias (características) a la compresión obtenidas en las muestras alteradas con 5% de polvo de neumático

reciclado fueron: 247,71 kg/cm² y 279,46 kg/cm² para una relación a/c = 0,542 y 0,493 respectivamente, lo que podría suponer un ligero incremento de su resistencia en comparación con las muestras de hormigón normal.

- De acuerdo con el análisis de la gráfica 26 podríamos concluir que la resistencia a la compresión en muestras alteradas con polvo de neumático reciclado del 0% al 9%, presentan un ligero incremento de su resistencia respecto a las muestras de hormigón normal, sin embargo, a partir de este límite es evidente que las mezclas con mayor cantidad de PNR dentro de su dosificación, presentan una disminución considerable de su resistencia.
- Según el análisis de la gráfica 26, se podría añadir hasta un 14% con una relación a/c = 0,542 y hasta el 19% para a/c = 0,493 de PNR, para obtener un hormigón $f^c = 180$ kg/cm², que según la NEC-SE-HM, podría ser utilizado en elementos no estructurales como bordillos y replantillos.

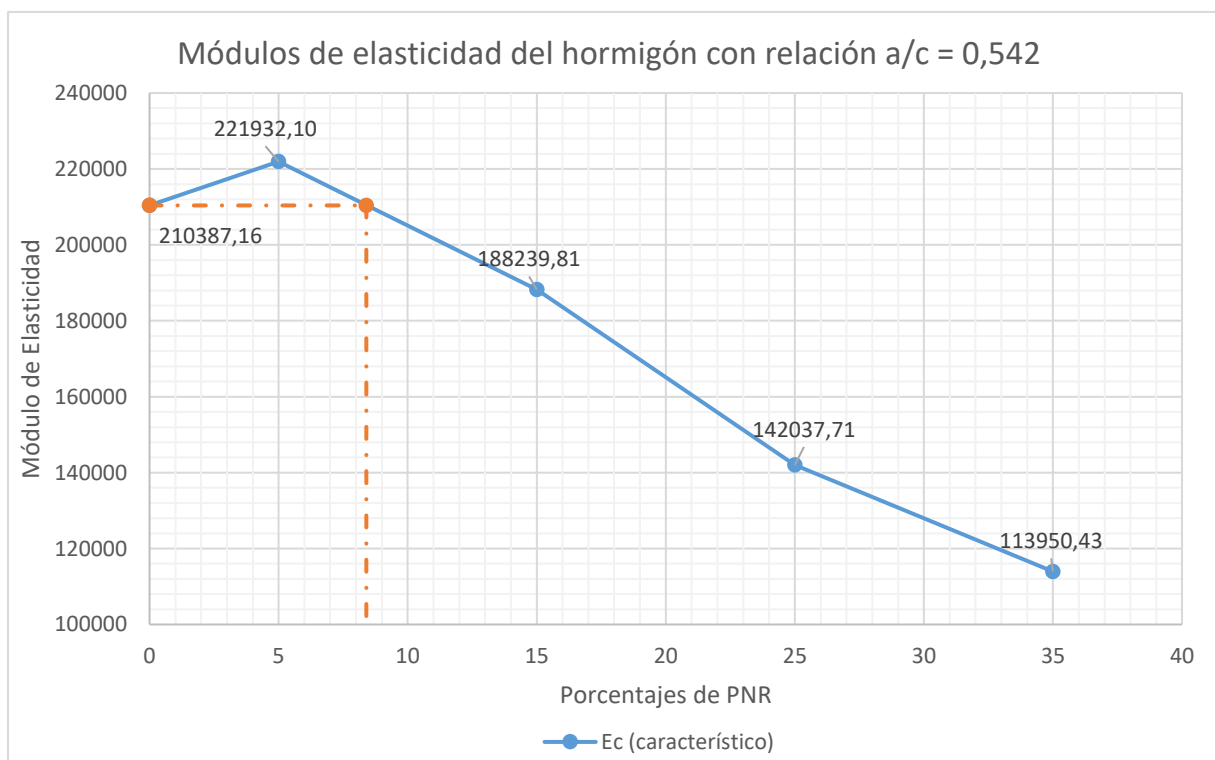
Gráfica 26. Análisis de la gráfica 7



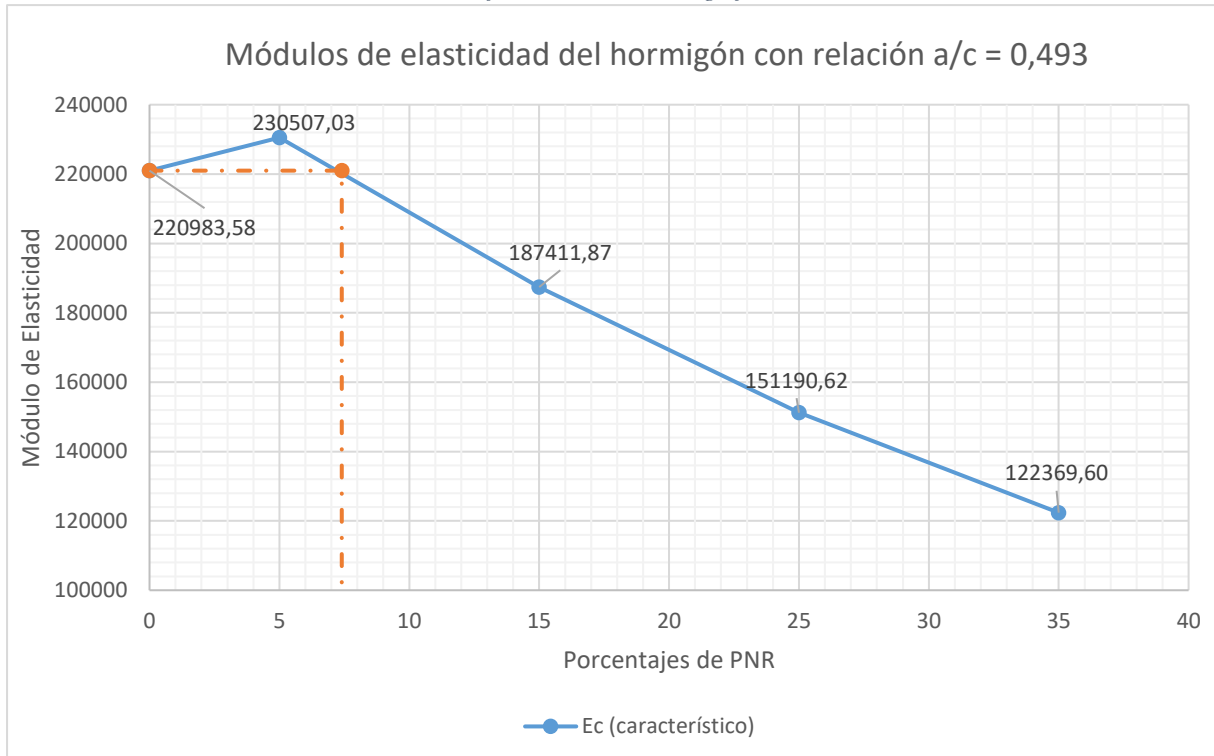
Fuente: Propia

- De los ensayos de flexión en vigas, los esfuerzos de tracción del hormigón como se observa en la gráfica 13, experimentan una ligera disminución de resistencia con respecto a las muestras normales de hormigón y varían del 1.6% al 47%.
- Los módulos de rotura en muestras alteradas con polvo de neumático reciclado desarrollaron cerca del 16 al 25% de la resistencia a compresión como se muestra en las gráficas 14 y 15.
- De acuerdo con el análisis de las gráficas 27 y 28, se puede concluir que los módulos de elasticidad (característicos) en muestras alteradas con polvo de neumático reciclado del 0 al 8% presentan un ligero incremento respecto a las muestras de hormigón normal, sin embargo, a partir de este límite, las mezclas con mayor cantidad de PNR dentro de su dosificación, presentan una disminución considerable de su valor de módulo de elasticidad.

Gráfica 27. Análisis de la gráfica 16



Gráfica 28. Análisis de la gráfica 17



Fuente: Propia

- Del análisis de la tabla 52 concluimos que; la ecuación para el cálculo de módulo de elasticidad en muestras normales de hormigón con materiales de Pifo y cemento Holcim tipo Gu es la siguiente:

$$E_c = 14200\sqrt{f'c} \left(\frac{kg}{cm^2} \right)$$

Sin embargo, esta ecuación se ve modificada en muestras alteradas con PNR como se muestra en la siguiente expresión:

$$E_c = \alpha\sqrt{f'c} \left(\frac{kg}{cm^2} \right)$$

Donde α dependerá de la cantidad de PNR añadida a la mezcla, y su valor constante se encontrará entre 12100 y 13800 como se muestra en la tabla anteriormente mencionada.

5.2. Comentarios

- Según los valores obtenidos en la gráfica 8, podemos observar que, a medida que se incrementa el polvo de neumático reciclado dentro de las dosificaciones de hormigón su densidad baja de 2178 kg/m³ hasta 1984 kg/m³, sin embargo, esta densidad no cumple dentro de los parámetros para considerarlo como un hormigón ligero, que de acuerdo con los valores dados por el ACI 318 es de 1400 kg/m³ a 1880 kg/m³.
- Las propiedades físico-mecánicas del hormigón con polvo de neumático reciclado obtenidas en esta investigación entre el 0 y 9%, presentaron resultados que podrían encajar dentro de los requerimientos técnicos y mecánicos para ser utilizados en la fabricación de elementos estructurales.

5.3. Recomendaciones

- Para confirmar los valores obtenidos en esta investigación se recomienda realizar este trabajo con un mayor número de muestras para el análisis, mediante la incorporación de materiales pétreos y cementantes provenientes de diferentes zonas.
- En futuras investigaciones se recomienda estudiar las variantes comprendidas entre el 5 y 15% de polvo de neumático reciclado reemplazado por agregado fino en mezclas de hormigón, para determinar su dosificación óptima.
- Se recomienda analizar el comportamiento entre el acero de refuerzo y el hormigón con añadidura de polvo de neumático reciclado, para comprobar que exista una correcta compatibilidad química entre estos materiales, en la elaboración de estructuras de hormigón armado.

6. Bibliografía

- Ambientalex. (2018). LA ADICIÓN DE PARTÍCULAS DE NEUMÁTICOS RECICLADOS EN EL CONCRETO. *Ambientalex*, 1-2.
- American Concrete Institute, C.-9. (1995). *Método Estándar de Ensayo para MÓDULO DE ELASTICIDAD ESTÁTICO Y RELACIÓN DE POISSON DEL CONCRETO EN COMPRESIÓN*. USA: Annual Book of ASTM Standard.
- Campaña, O., Galeas, S., & Guerrero, V. (2015). Obtención de Asfalto Modificado con Polvo de Caucho Proveniente del Reciclaje de Neumáticos de Automotores. *Revista Politécnica*, 1-2.
- Daza, P. (2010). *CONSTRUCCIÓN SOSTENIBLE DE EDIFICIOS: UNA ALTERNATIVA RESPONSABLE PARA EL DESARROLLO URBANO DE QUITO*. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.
- Delgado, C. (2008). *Hidrogeología y Modelación del Acuífero Pifo – El Quinche*. Tesis de grado. Quito: Escuela Politécnica Nacional.
- Energíanuclear. (10 de Octubre de 2010). *LA ENERGIA NUCLEAR EN ESPAÑA*. Obtenido de COMPONENTES DE LOS NEUMATICOS Y NEGRO DE HUMO OBTENIDO DE SU TRATAMIENTO POR PIROLISIS.: <https://almacennuclear.wordpress.com/2010/10/15/componentes-de-los-neumaticos-y-negro-de-humo-obtenido-de-su-tratamiento-por-pirolisis/>
- Eraso, H. (2015). *ESTUDIO DEL COMPORTAMIENTO MECÁNICO DEL CONCRETO, SUSTITUYENDO PARCIALMENTE EL AGREGADO FINO POR CAUCHO MOLIDO RECUBIERTO CON POLVO CALCÁREO*. Cali: Pontificia Universidad Javeriana de Cali.
- Espinoza, R., & Domenech, M. (2016). *DETERMINACIÓN DE LA PROPIEDADES FÍSICO-MECÁNICAS DE LOS HORMIGONES Y MORTEROS UTILIZANDO MATERIALES*

PÉTREOS DE LAS CANTERAS DE PIFO Y POMASQUI-SAN ANTONIO. QUITO: PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR.

Esteve, J. (26 de Junio de 2012). *Reciclaje Verde*. Obtenido de RECICLAJE DE NEUMÁTICOS: PROCESOS Y USOS: <https://reciclajeverde.wordpress.com/2012/06/26/reciclaje-de-neumaticos-procesos-y-usos/>

Flores, N., Flores, D., & Hernández, F. (2016). Influence of fibers partially coated with rubber from tire recycling as aggregate on the acoustical properties of rubberized concrete. *Construction and Building Materials*, 25-36.

Garzón, W. (2013). *Estudio de Durabilidad al Ataque de Sulfatos del Concreto con Agregado Reciclado*. Bogotá: Universidad Nacional de Colombia.

Gonnerman, H., & Shuman, E. (1928). *Flexure and Tension test of Plain Concrete*. USA: Portland Cement Association.

INEN, N. (2011). *NTE INEN 3063: HORMIGÓN CON FIBRAS DE ACERO. DETERMINACIÓN DE LA RESISTENCIA A LA TRACCIÓN POR FLEXIÓN (LÍMITE DE PROPORCIONALIDAD (LOP)*. Quito, Ecuador: Instituto Ecuatoriano de Normalización, Norma Técnica Ecuatoriana.

Isabel, A. (15 de Julio de 2018). *El Comercio*. Obtenido de Las llantas tienen más opciones de reciclaje : <https://www.elcomercio.com/tendencias/llantas-reciclaje-materiales-neumaticos-planetaeideas.html>

Jiménez, P. (1973). *Hormigón Armado. Tomo I*. Barcelona: Gustavo Gili.

Kosmatka, S., Kerkhoff, B., Panarese, W., & Tanesi, J. (2004). *Diseño y Control de Mezclas de Concreto*. México D.F.: Portland Cement Association-PCA.

Líderes. (10 de Julio de 2018). *Líderes*. Obtenido de Un grupo de empresas que recicla llantas: <https://www.revistalideres.ec/lideres/grupo-empresas-recicla-llantas-estrategias.html>

Morante, B. (2019). *UTILIZACION DE GRANULOS DE CAUCHO TRITURADO DE NEUMATICOS FUERA DE USO EN MEZCLAS ASFALTICAS EN FRIO CON EMULSION Y MATERIAL FRESADO*. Quito: Pontificia Universidad Católica del Ecuador.

Osorio, J. (19 de Enero de 2011). *360 EN CONCRETO*. Obtenido de ¿QUÉ ES EL MÓDULO DE ELASTICIDAD EN EL CONCRETO?: <https://www.360enconcreto.com/blog/detalle/categoryid/178/categoryname/concreto/elasticidad-del-concreto>

Sofi, A. (2017). Effect of waste tyre rubber on mechanical and durability properties of concrete. *Ain Shams Engineering Journ*, 1-2.

American Society for Testing Materials. C109/C109M – 13: *Standard test Method for Compressive Strength of Hydraulic Cement Mortars (Using 2-in or [50-mm] Cube Specimens)*. Pensilvania, ASTM, 2013.

American Society for Testing Materials. C117 – 13: *Standard Test Method for Materials Finer than 75-um (No.200) Sieve in Mineral Aggregates by Washing*. Pensilvania, ASTM, 2009.

American Society for Testing Materials. C127 – 15: *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Coarse Aggregate*. Pensilvania, ASTM, 2015.

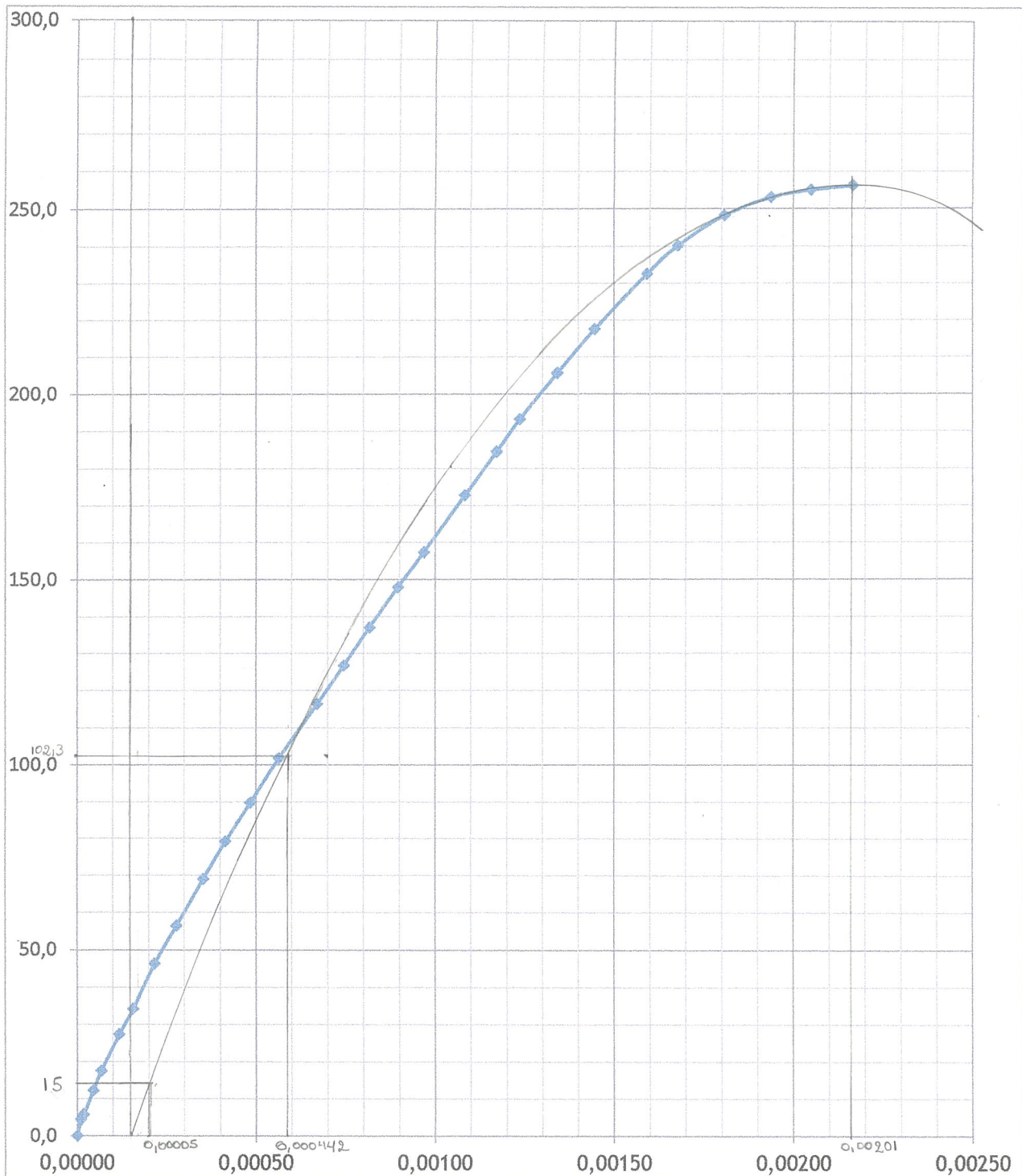
American Society for Testing Materials. C128 – 15: *Standard Test Method for Relative Density (Specific Gravity) and Absorption of Fine Aggregate*. Pensilvania, ASTM, 2015.

American Society for Testing Materials. C131/C131M – 14: *Standard Test Method for Resistance to Degradation of Small-Size Coarse Aggregate by Abrasion and Impact in*

- the Los Angeles Machine*. Pensilvania, ASTM, 2014.
- American Society for Testing Materials. C136/C136M – 14: *Standard Test Method for Sieve Analysis of Fine and Coarse Aggregates*. Pensilvania, ASTM, 2014.
- American Society for Testing Materials. C142/C142M – 10: *Standard Test Method for Clay Lumps and Friable Particles in Aggregates*. Pensilvania, ASTM, 2010.
- American Society for Testing Materials. C143/C143M – 15: *Standard Test Method for Slump of Hydraulic-Cement Concrete*. Pensilvania, ASTM, 2015.
- American Society for Testing Materials. C1437 – 13: *Standard Test Method for Flow of Hydraulic Cement Mortar*. Pensilvania, ASTM, 2009.
- American Society for Testing Materials. C151/C151M – 15: *Standard Test Method for Autoclave Expansion of Hydraulic Cement*. Pensilvania, ASTM, 2015.
- American Society for Testing Materials. C1602/C1602M – 12: *Standard Specification for Mixing Water Used in the Production of Hydraulic Cement Concrete*. Pensilvania, ASTM, 2012.
- American Society for Testing Materials. C188 – 14: *Standard Test Method for Density of Hydraulic Cement*. Pensilvania, ASTM, 2014.
- American Society for Testing Materials. C192/C192M – 15: *Standard Practice for Making and Curing Concrete Test Specimens in the Laboratory*. Pensilvania, ASTM, 2015.
- American Society for Testing Materials. C204 – 11: *Standard Test Method for Fineness of Hydraulic Cement by Air-Permeability Apparatus*. Pensilvania, ASTM, 2011.
- American Society for Testing Materials. C29/C29M – 09: *Standard Test Method for Bulk Density (“Unit Weight”) and Voids in Aggregate*. Pensilvania, ASTM, 2009.
- American Society for Testing Materials. C305 – 14: *Standard Practice for Mechanical Mixing of Hydraulic Cement Pastes and Mortars of Plastic Consistency*. Pensilvania, ASTM, 2014.

- American Society for Testing Materials. C33/C33M – 13: *Standard Specification for Concrete Aggregates*. Pennsylvania, ASTM, 2013.
- American Society for Testing Materials. C39/C39M – 15a: *Standard Test Method for Compressive Strength of Cylindrical Specimens*. Pennsylvania, ASTM, 2015.
- American Society for Testing Materials. C40/C40M – 11: *Standard Test Method for Organic Impurities in Fine Aggregates for Concrete*. Pennsylvania, ASTM, 2011.
- American Society for Testing Materials. C566 – 13: *Standard Test Method for Total Evaporable Moisture Content of Aggregate by Drying*. Pennsylvania, ASTM, 2013.
- American Society for Testing Materials. C595/C595M – 15: *Standard Specification for Blended Hydraulic Cements*. Pennsylvania, ASTM, 2015.
- American Society for Testing Materials. C778 – 13: *Standard Specification for Standard Sand*. Pennsylvania, ASTM, 2013.
- American Society for Testing Materials. C88 – 13: *Standard Test Method for Soundness of Aggregates by Use of Sodium Sulfate or Magnesium Sulfate*. Pennsylvania, ASTM, 2013.

7. Anexos



$$F'c_{max} = 255,8 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{max} = 102,3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{max}} = 0,0005675 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 13,37 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

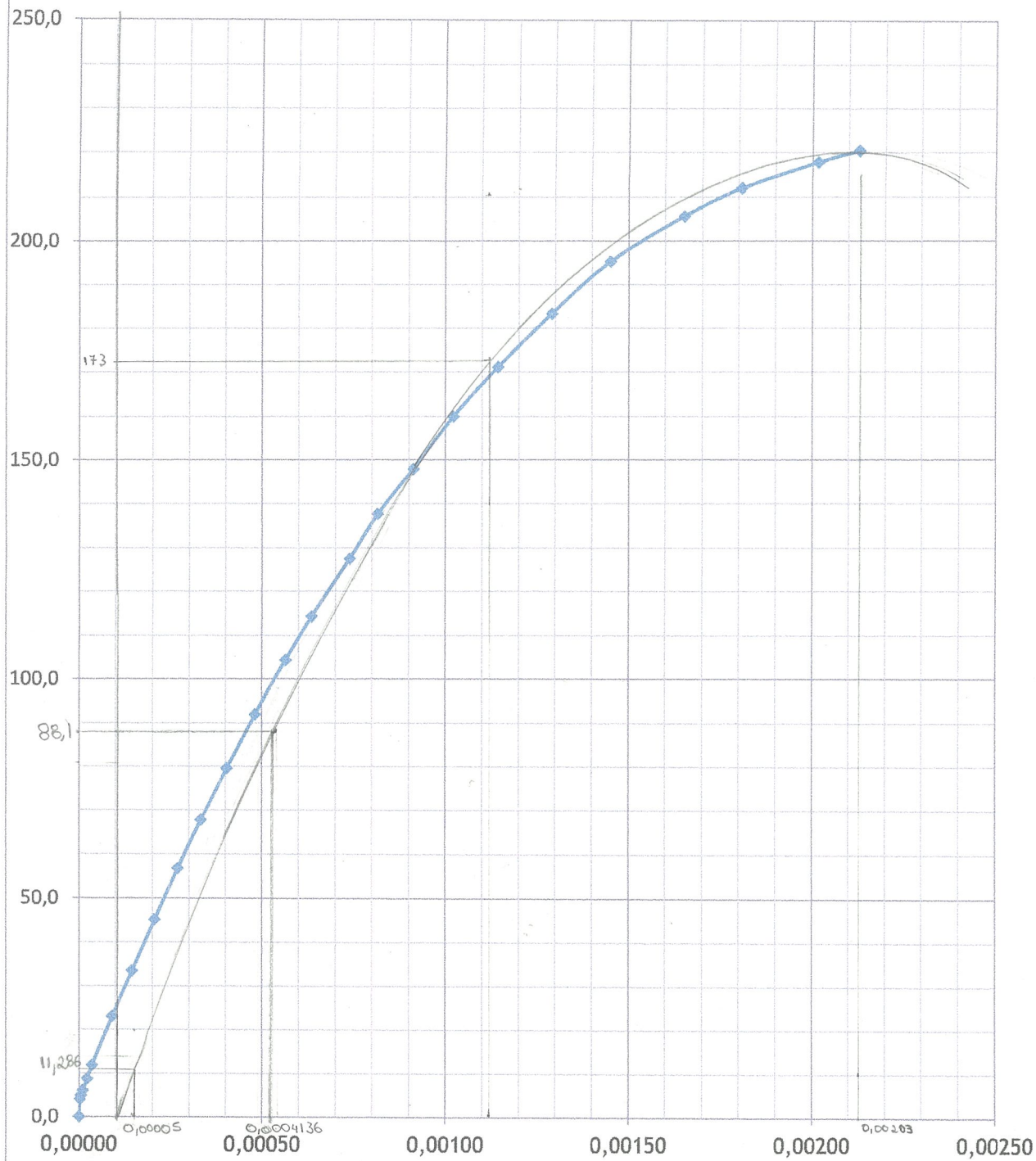
$$E_c (cal) = 16848,14 \text{ MPa}$$

210 - 5%

$$E_c = \frac{102,3 - 15}{0,000442 - 0,00005} = 222942,52 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\alpha = \frac{222942,52}{\sqrt{255,8}} = 13939,35$$

$$\alpha = 4270 (2,189)^{1,5} = 13829$$



$$F'c \max = 220,3 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{\max} = 88,1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\varepsilon_{0,4 T_{\max}} = 0,00045694 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 14,751 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

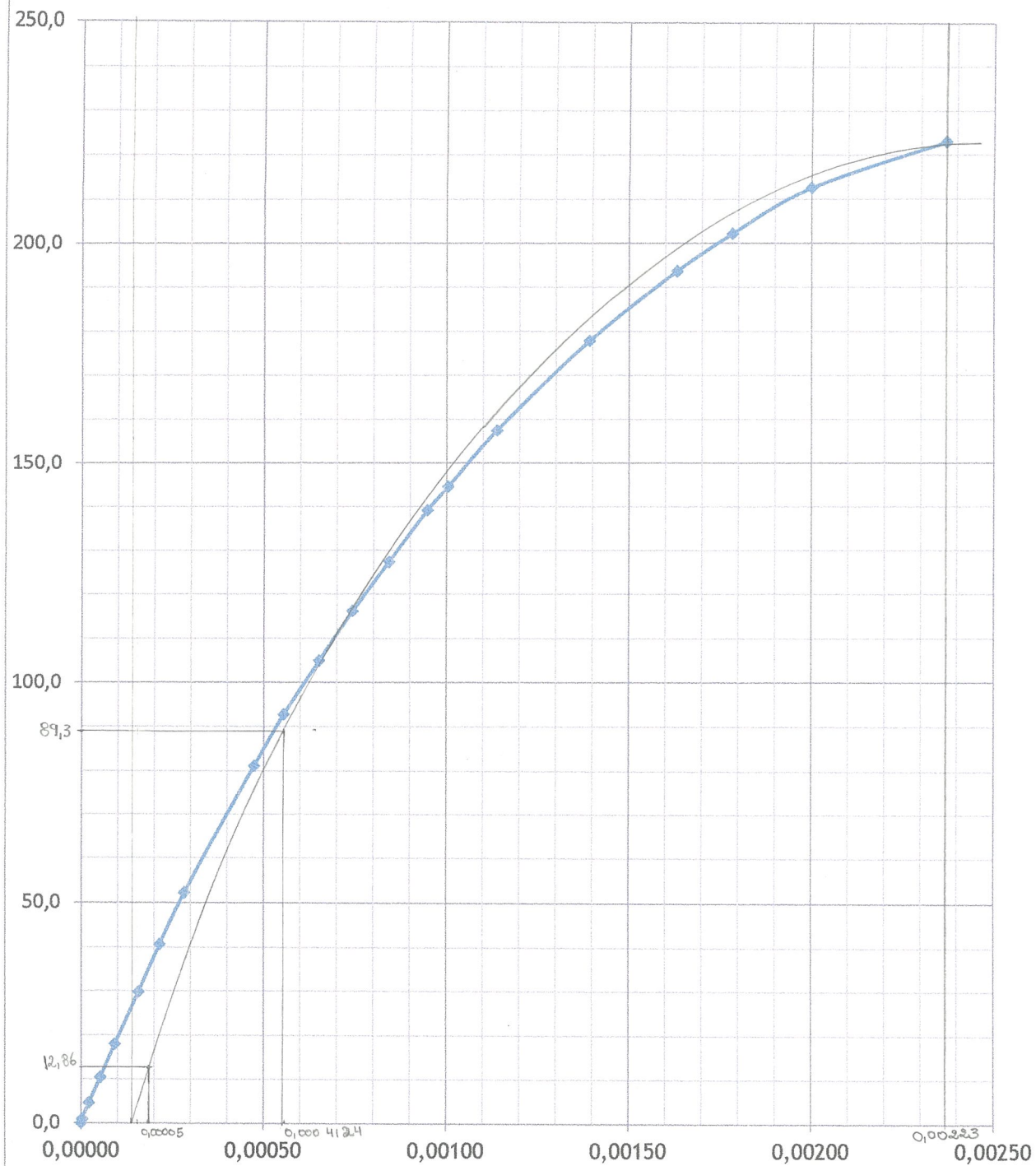
$$E_c (\text{cal}) = 17676,93 \text{ MPa}$$

210 - 0%

$$E_c = \frac{88,1 - 11,286}{0,0004136 - 0,00005} = 211259,63 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\alpha = \frac{211259,63}{\sqrt{220,3}} = 14233,42$$

$$\alpha = 4270 \times (2,257)^{1,5} = 14478,55$$



$$F'c \max = 223,3 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{\max} = 89,3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{\max}} = 0,00053051 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 9,94 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

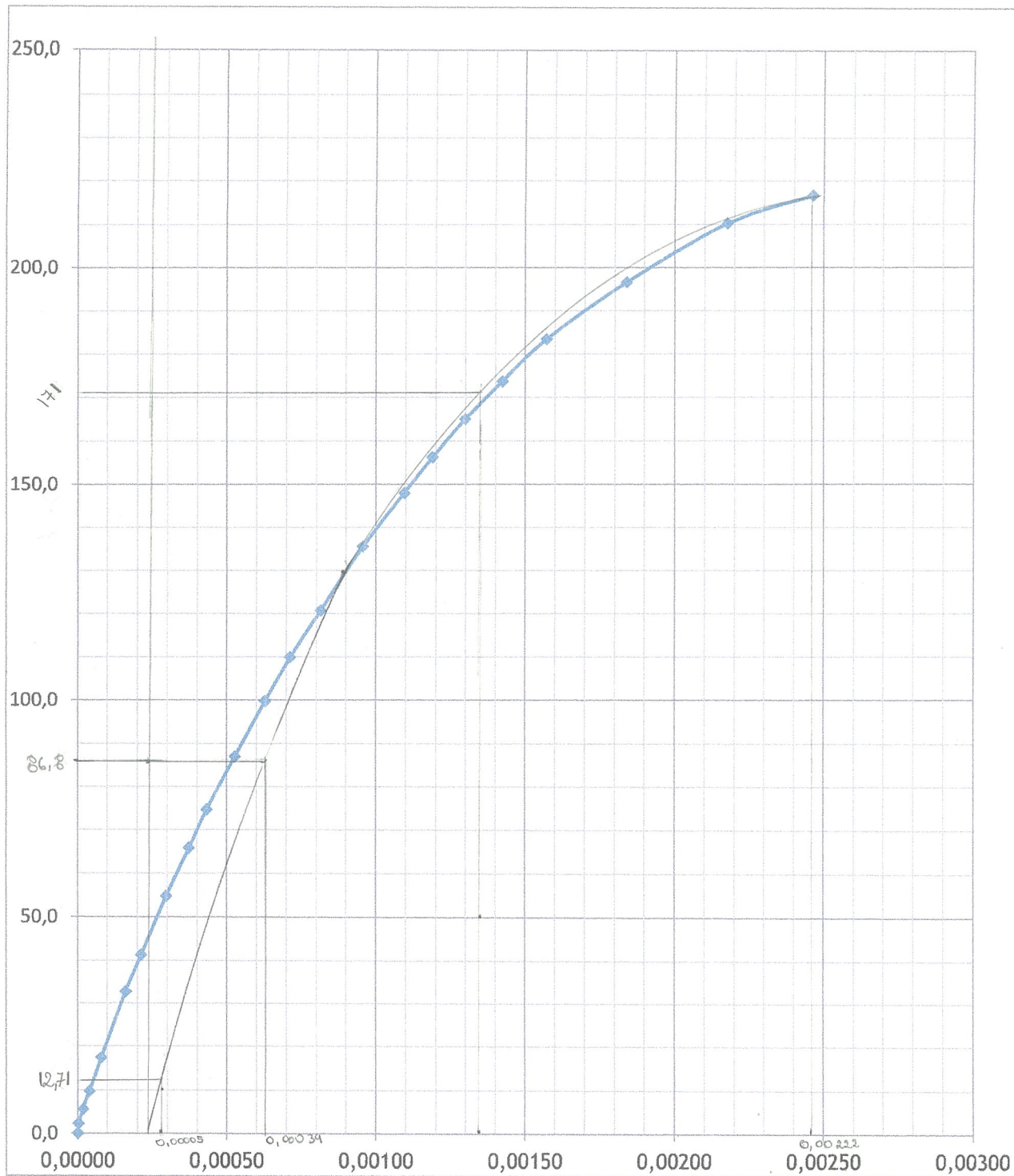
$$E_c (\text{cal}) = 16193,21 \text{ MPa}$$

210 - 0%

$$E_c = \frac{89,3 - 12,86}{0,0004124 - 0,00005} = 210943,95 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$d = \frac{210943,95}{\sqrt{223,3}} = 14116,36$$

$$\alpha = 4270 (2,257)^{1,5} = 14478,55$$



$$F'c_{max} = 216,9 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{max} = 86,8 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{max}} = 0,00052525 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 11,81 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

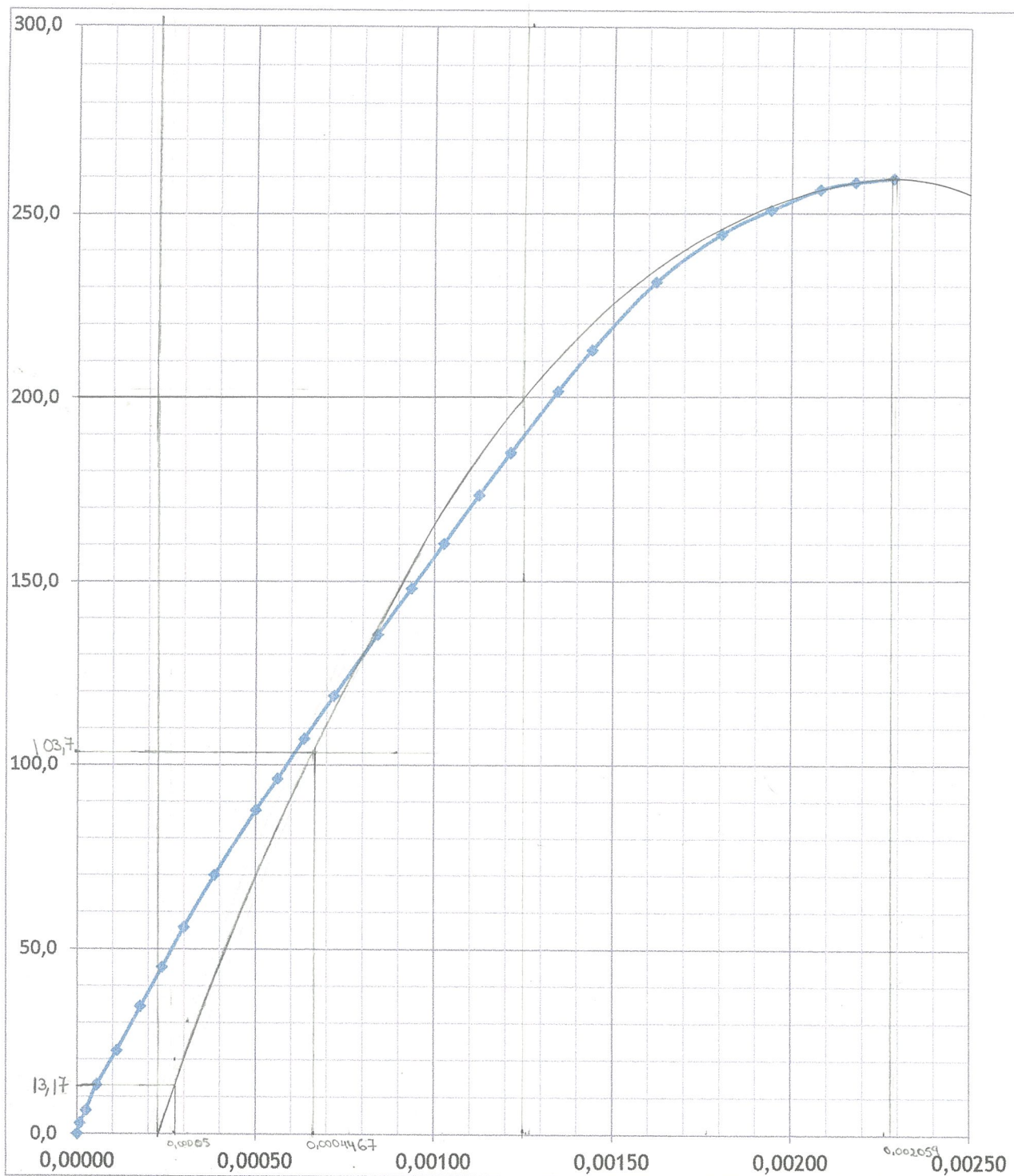
$$E_c (\text{cal}) = 15459,66 \text{ MPa}$$

210 - 0%

$$E_c = \frac{86,8 - 12,714}{0,00034 - 0,00005} = 212662,26 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\alpha = \frac{212662,26}{\sqrt{216,9}} = 14439,78$$

$$\alpha = 4270 \cdot (2,258)^{1,5} = 14488,18$$



$$F'c_{max} = 259,2 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{max} = 103,7 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{max}} = 0,00061047 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 12,19 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

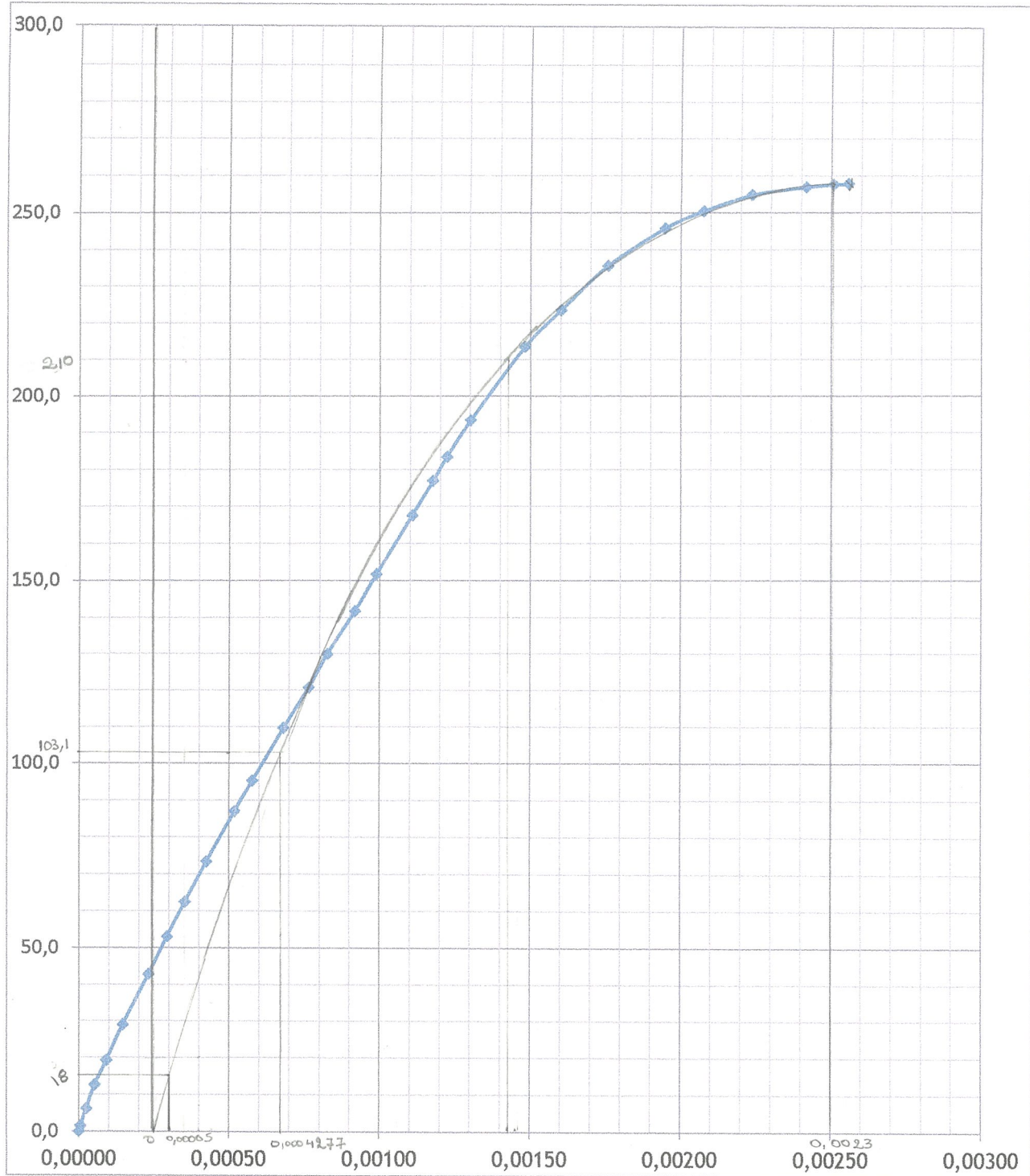
$$E_c (\text{cal}) = 16002,92 \text{ MPa}$$

210 - 5%

$$E_c = \frac{103,7 - 13,17}{0,0004467 - 0,00005} = 228187,35 \text{ kg/cm}^2$$

$$\alpha = \frac{228187,35}{\sqrt{289,2}} = 14173,4$$

$$\alpha = 4270 \times (2,195)^{1,5} = 13886,08$$



$$F'c_{max} = 257,9 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{max} = 103,1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{max}} = 0,0006287 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 12,22 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

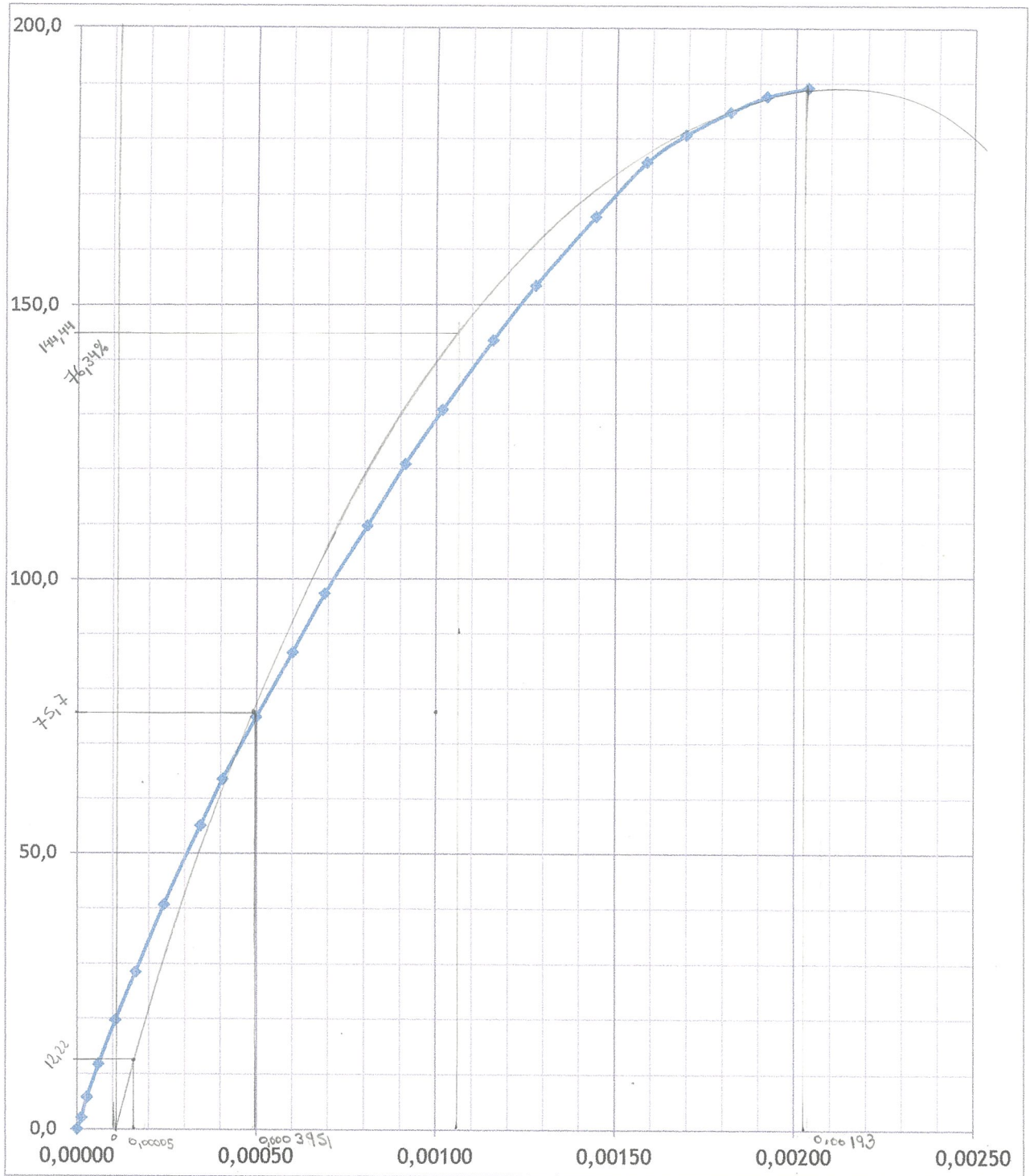
$$E_c (\text{cal}) = 15402,31 \text{ MPa}$$

210 - 5%

$$E_c = \frac{103,1 - 18}{0,0004277 - 0,00005} = 225304,63 \text{ kg/cm}^2$$

$$\alpha = \frac{225304,63}{\sqrt{257,9}} = 14029,57$$

$$\alpha = 4270 \cdot (2,228)^{1,5} = 14200,403$$



$$F'c_{max} = 189,2 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{max} = 75,7 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{max}} = 0,00050595 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 10,039 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

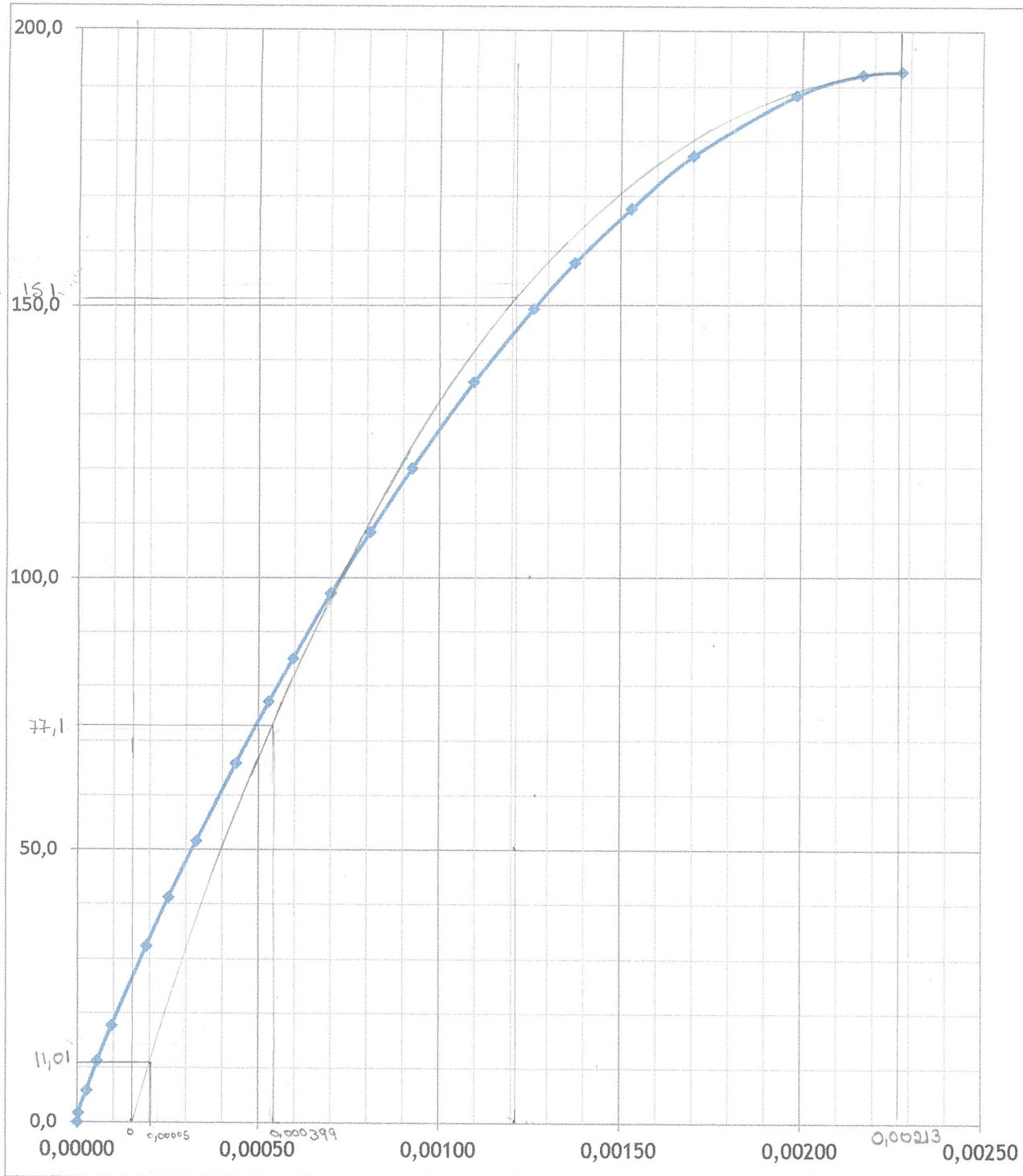
$$E_c (cal) = 14110,41 \text{ MPa}$$

210 - 15%

$$E_c = \frac{75,7 - 12,22}{0,0003951 - 0,00005} = 188592,96$$

$$\alpha = \frac{188592,96}{\sqrt{189,2}} = 13710,87$$

$$\alpha = 4270 \cdot (2,164)^{1,5} = 13592,95 //$$



$$F'c_{max} = 192,7 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{max} = 77,1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{max}} = 0,00052856 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 10,496 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

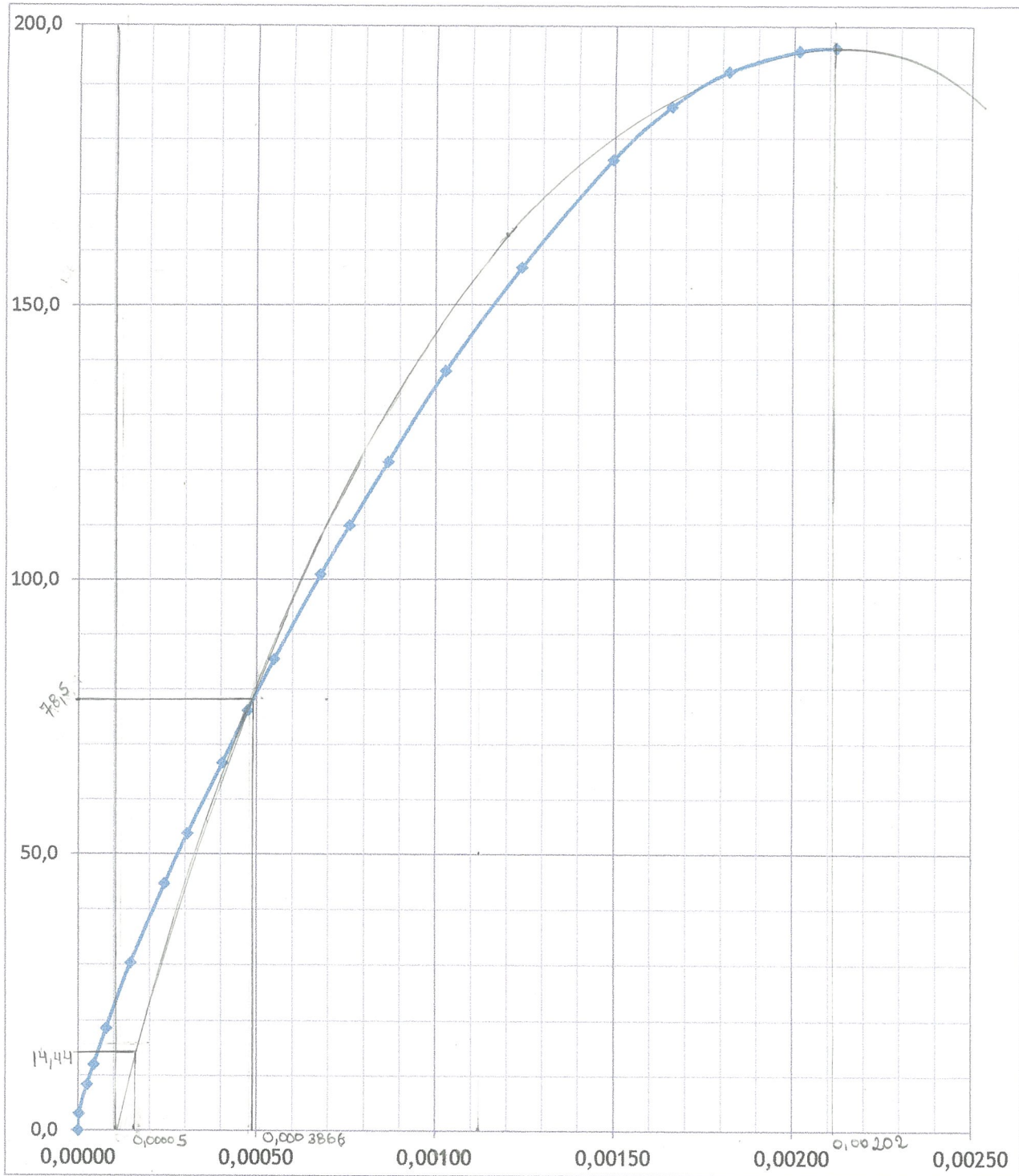
$$E_c (\text{cal}) = 13639,04 \text{ MPa}$$

210 - 15%

$$E_c = \frac{77,1 - 11,01}{0,000399 - 0,00005} = 189314,93$$

$$\alpha = \frac{189314,93}{\sqrt{192,7}} = 13637,79$$

$$\alpha = 4270 \cdot (2125)^{1,5} = 13227,15$$



$$F'c \max = 196,4 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{\max} = 78,5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{\max}} = 0,00049396 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 13,121 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

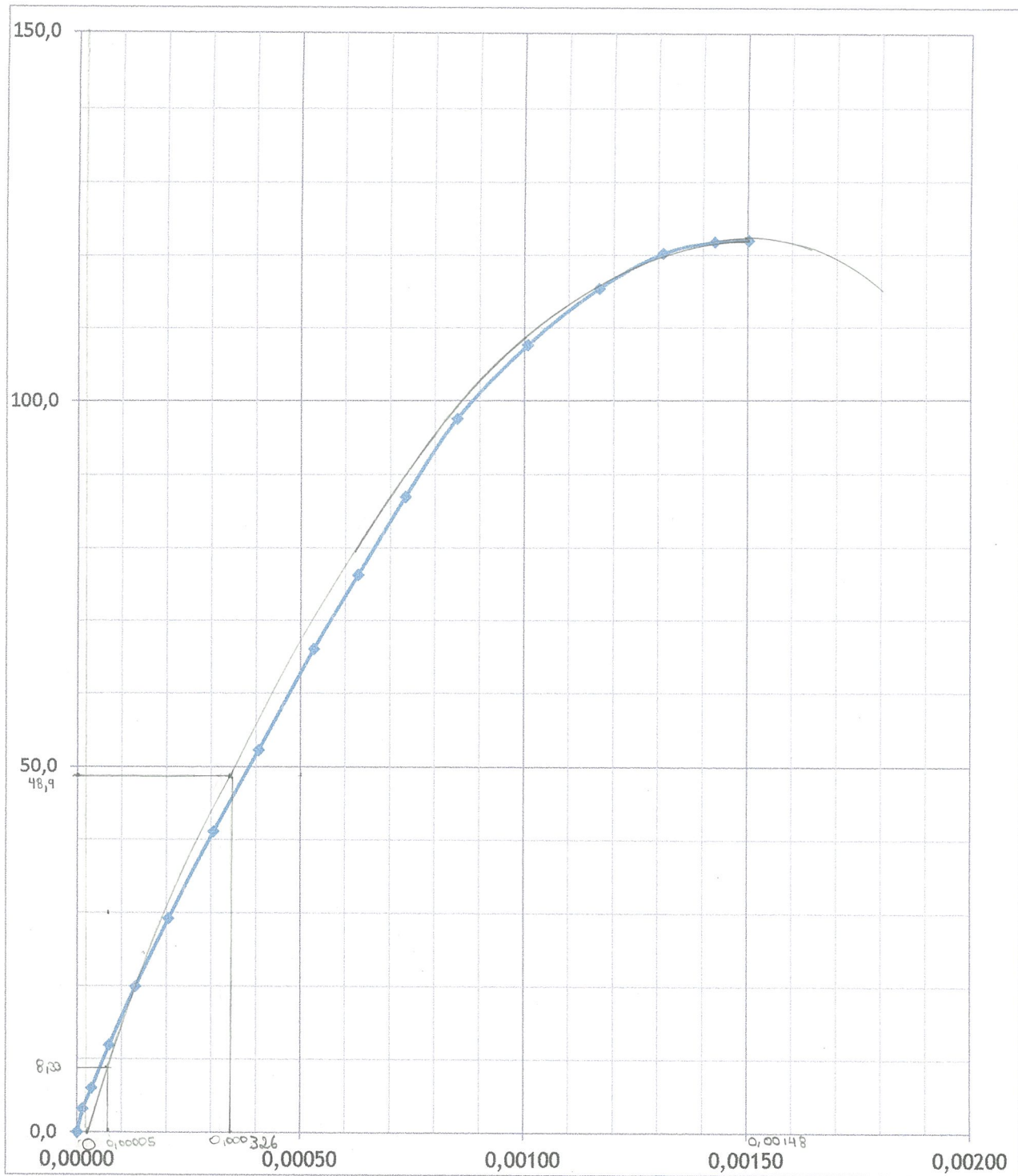
$$E_c (\text{cal}) = 14448,37 \text{ MPa}$$

210 - 15%

$$E_c = \frac{78,5 - 14,44}{0,0003866 - 0,00005} = 190316,08 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\alpha = \frac{190316,08}{\sqrt{196,4}} = 13580,16 //$$

$$\alpha = 4270 \cdot (2,142)^{1,5} = 13395,57$$



$$F'c \max = 122,1 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{\max} = 48,9 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{\max}} = 0,00037587 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 8,66 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

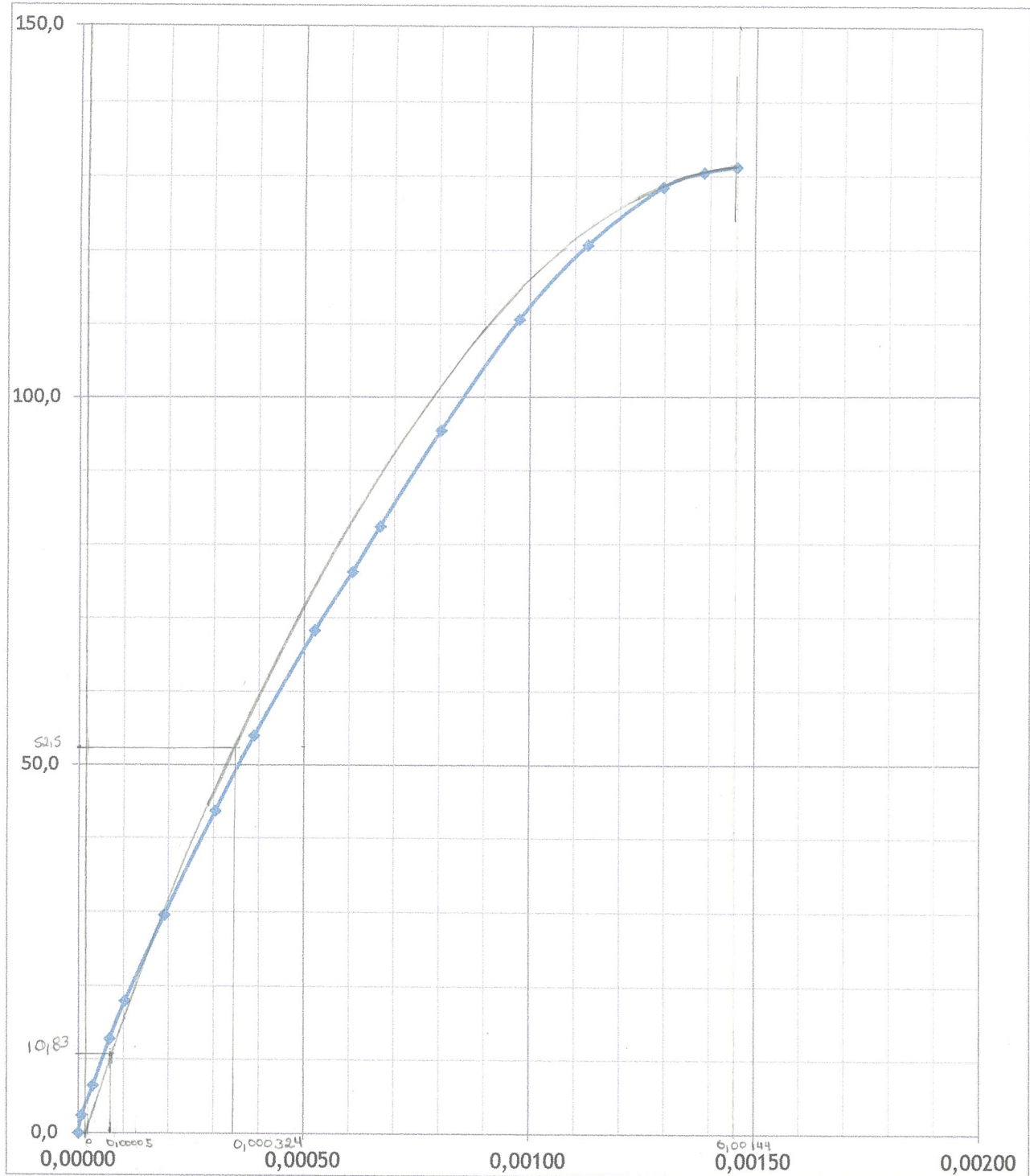
$$E_c (\text{cal}) = 12092,32 \text{ MPa}$$

210 - 25%

$$E_c = \frac{48,9 - 8,33}{0,000326 - 0,00005} = 146946,46$$

$$\alpha = \frac{146946,46}{\sqrt{122,1}} = 13298,46$$

$$\alpha = 4270(2,095) = 12948,04$$



$$F'c_{max} = 131,2 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{max} = 52,5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{max}} = 0,00037655 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 9,598 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

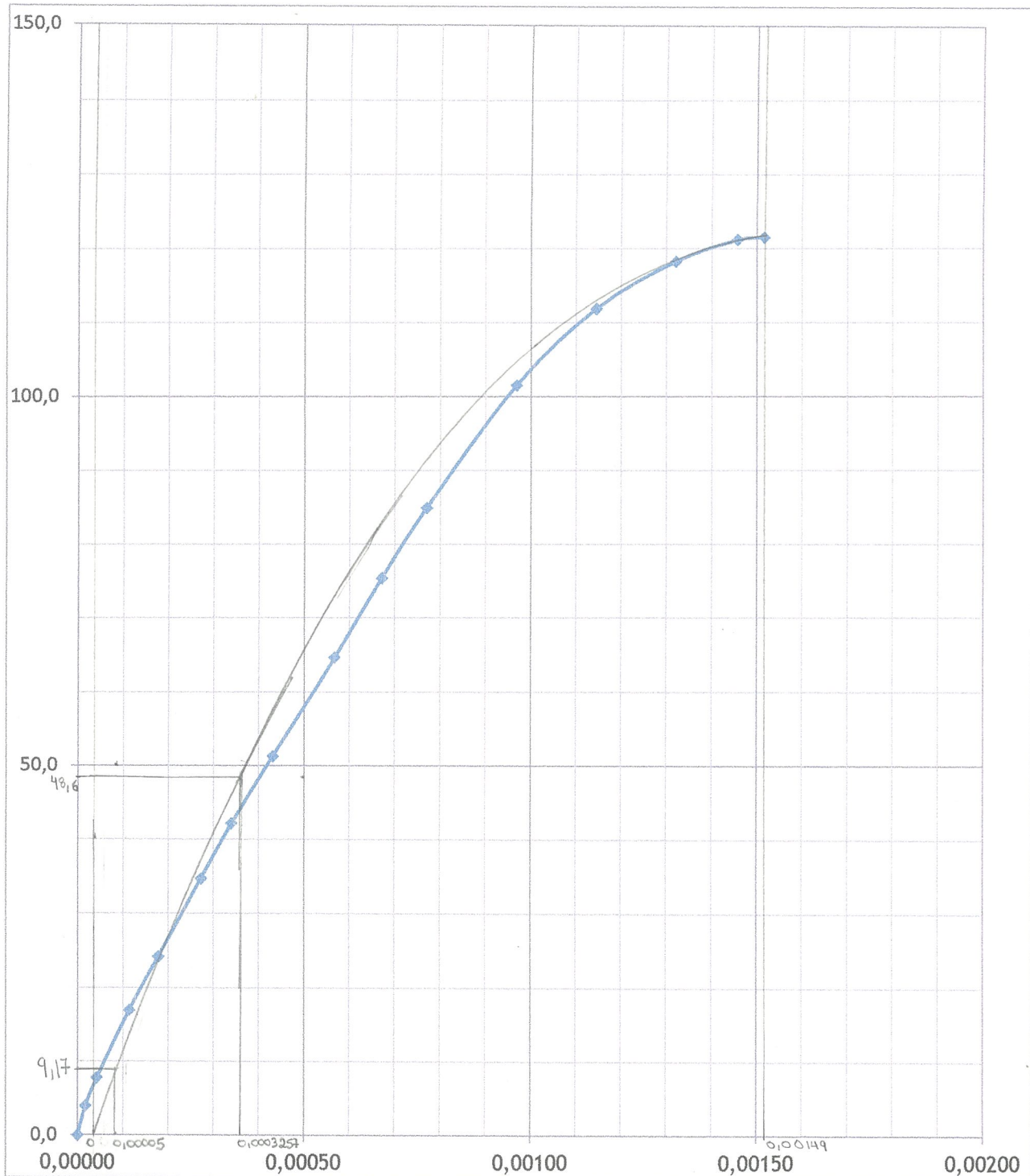
$$E_c (cal) = 12871,99 \text{ MPa}$$

210 - 25%

$$E_c = \frac{52,5 - 10,83}{0,000328 - 0,00005} = 149.688,35$$

$$\alpha = \frac{149688,35}{\sqrt{131,2}} = 13068,36$$

$$\alpha = 4270 (2,072)^{1,5} = 12735,39$$



$$F'c \text{ max} = 121,5 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{\text{max}} = 48,6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{\text{max}}} = 0,0004045 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 8,75 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

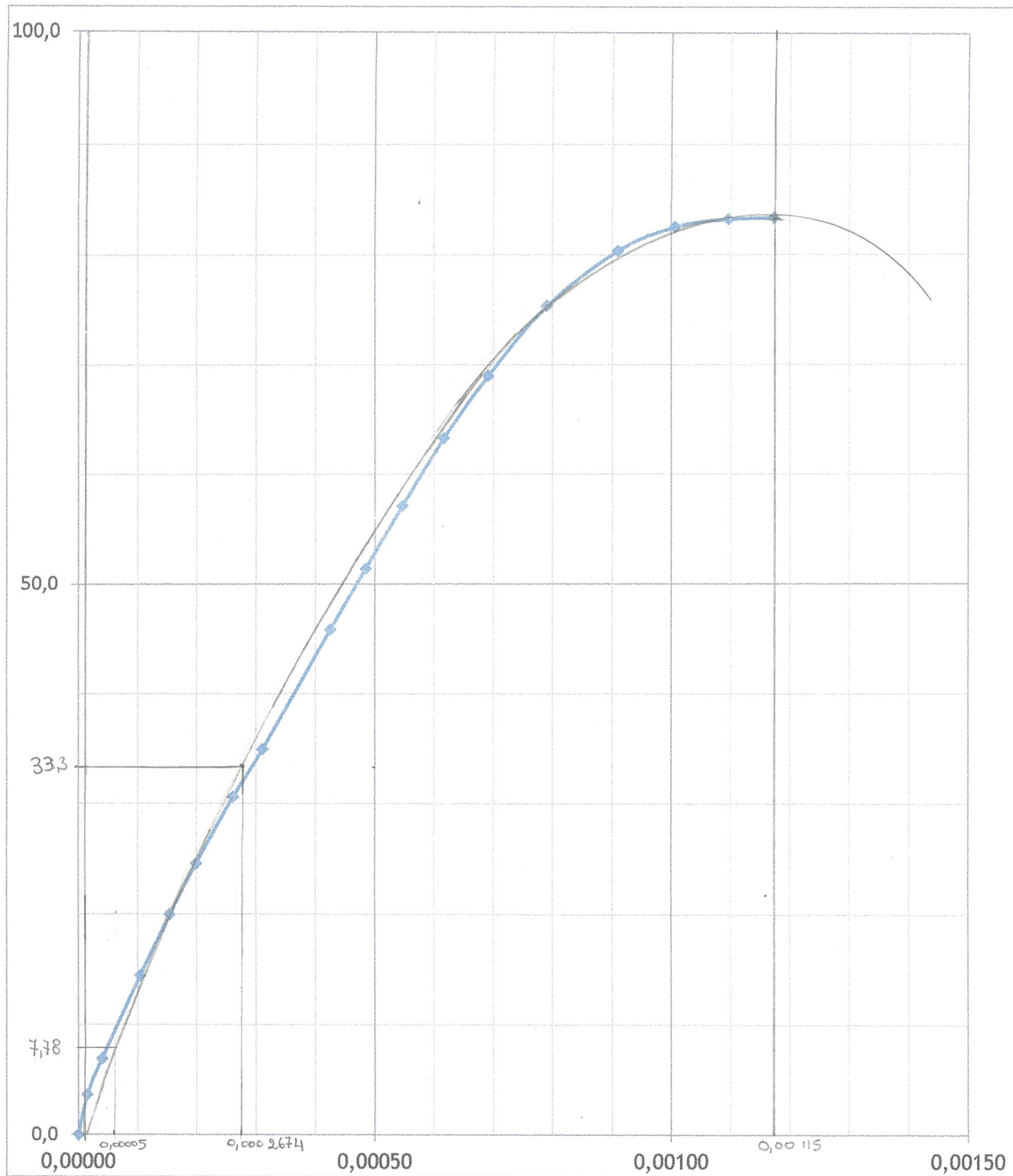
$$E_c (\text{cal}) = 11023,62 \text{ MPa}$$

210 - 25%

$$E_c = \frac{48,6 - 9,17}{0,0003257 - 0,00005} = 143030,39$$

$$\alpha = \frac{143030,39}{\sqrt{121,5}} = 12975,98$$

$$\alpha = 4270 (2,053)^{1,5} = 12560,62$$



$$F'c \max = 83,3 \text{ kg/cm}^2 *$$

$$0,4 T_{\max} = 33,3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\varepsilon_{0,4 T_{\max}} = 0,00029191 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 8,07 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

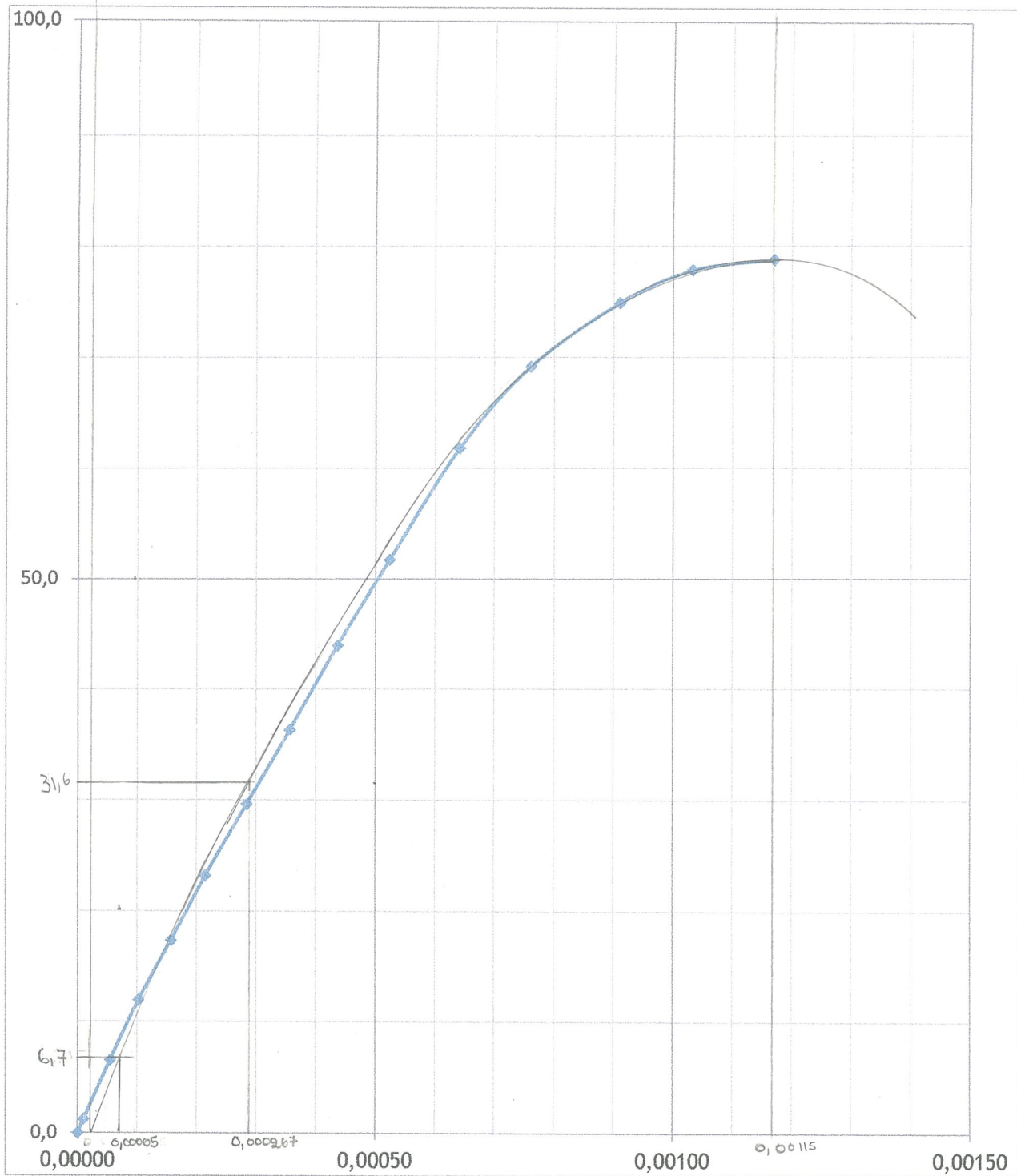
$$E_c (\text{cal}) = 10230,26 \text{ MPa}$$

210 - 35%

$$E_c = \frac{33,3 - 7,78}{0,0002674 - 0,00005} = 117338,88$$

$$\alpha = \frac{117338,88}{\sqrt{83,3}} = 12856,402$$

$$\alpha = 4270 \times (2,056)^{1,5} = 12588,17$$



$$F'c_{max} = 78,9 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{max} = 31,6 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\varepsilon_{0,4 T_{max}} = 0,0003055 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 5,97 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

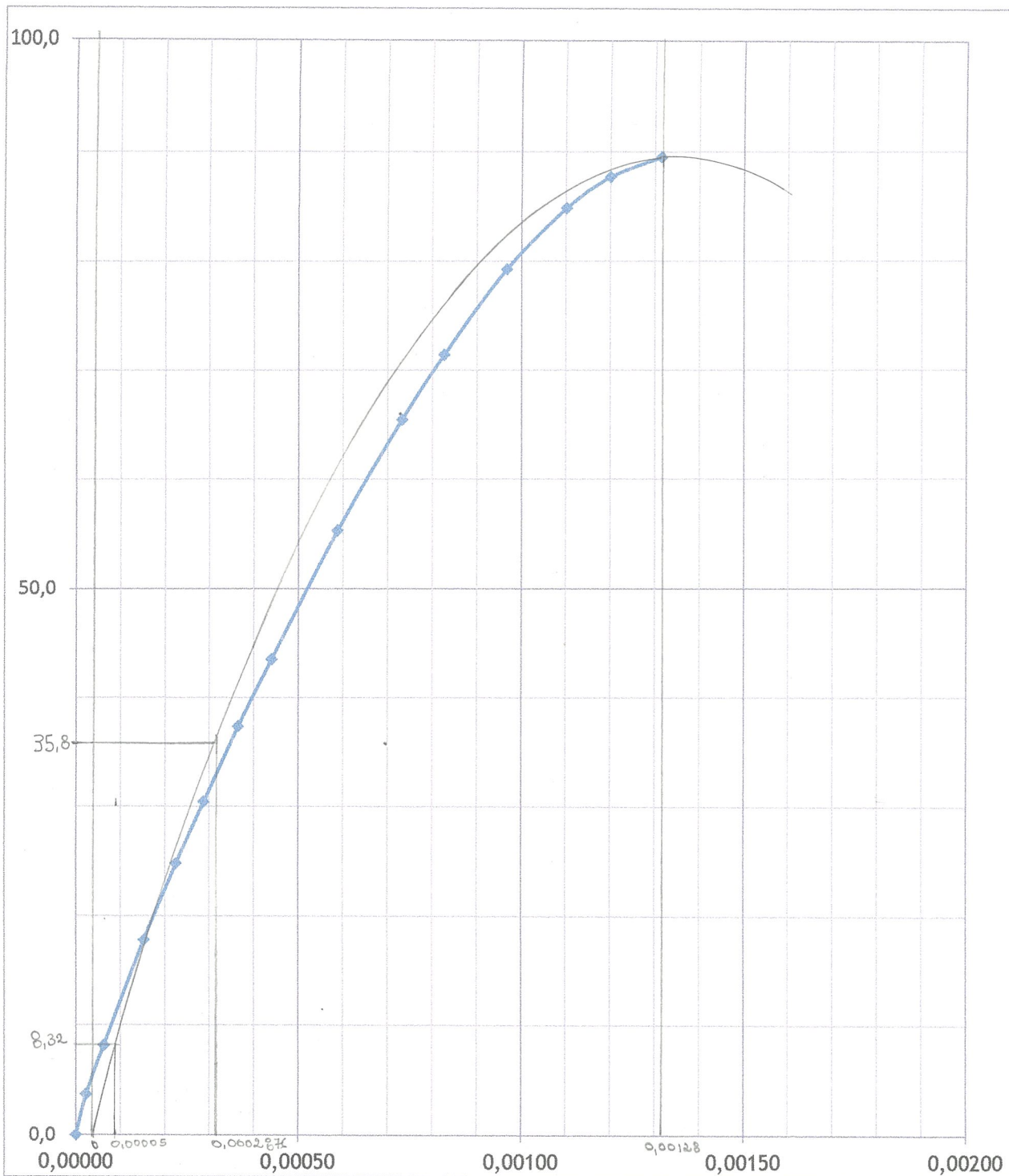
$$E_c (\text{cal}) = 9820,21 \text{ MPa}$$

210 - 35%

$$E_c = \frac{31,6 - 6,59}{0,000267 - 0,00005} = 114563,38$$

$$\alpha = \frac{114563,38}{\sqrt{78,9}} = 12897,155 //$$

$$\alpha = 4270(2,045)^{1,5} = 12487,28 //$$



$$F'c \max = 89,5 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{\max} = 35,8 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{\max}} = 0,00034786 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 6,77 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

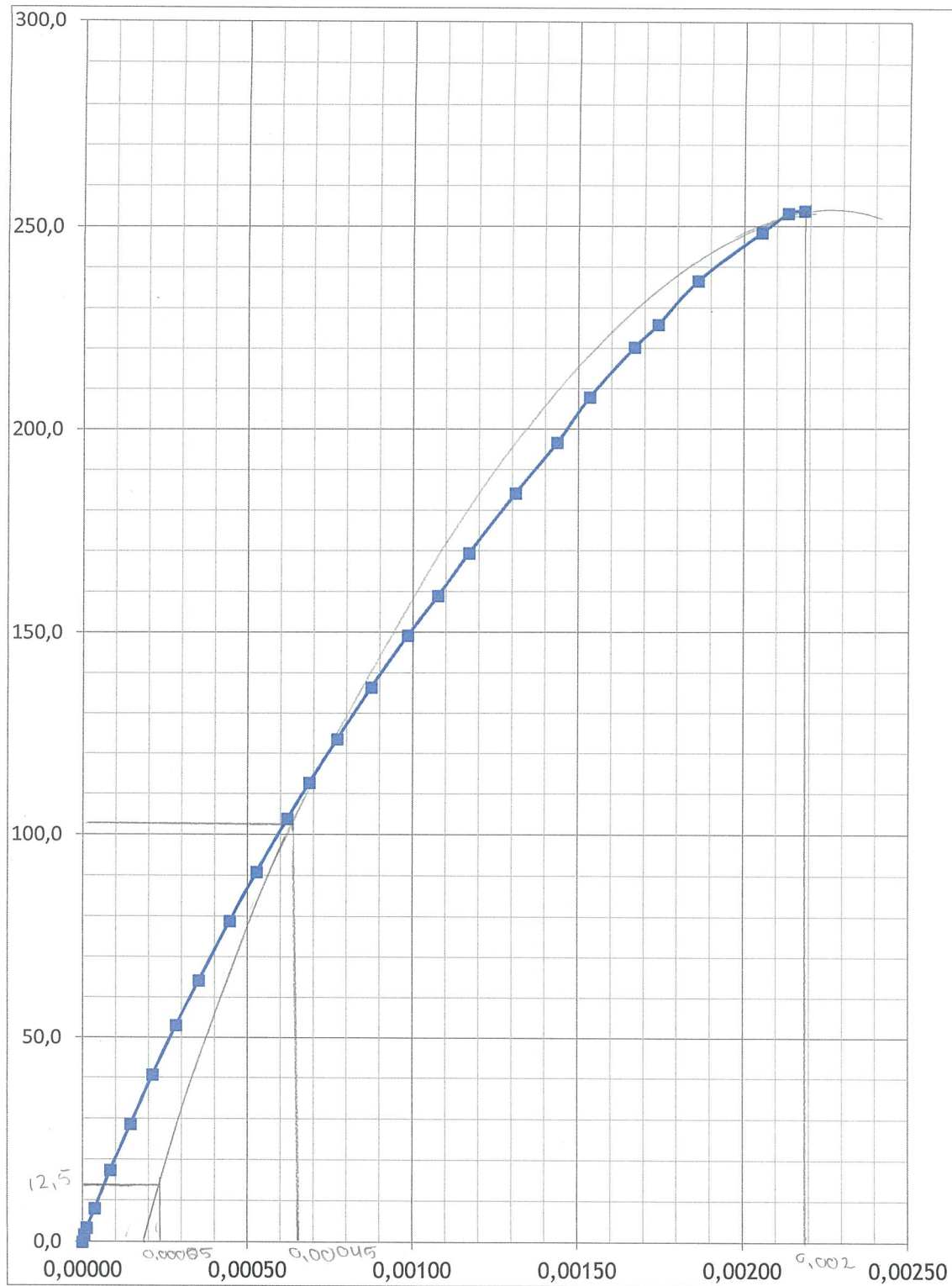
$$E_c (\text{cal}) = 9556,05 \text{ MPa}$$

210 - 35%

$$E_c = \frac{35,8 - 8,32}{0,0002877 - 0,00005} = 115621,902 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\alpha = \frac{115621,902}{\sqrt{89,5}} = 12221,61$$

$$\alpha = 4270 (2,016)^{1,5} = 12222,6$$



$$F'c \max = 256.1 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{\max} = 102.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{\max}} = 0,00061015 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 10.8 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

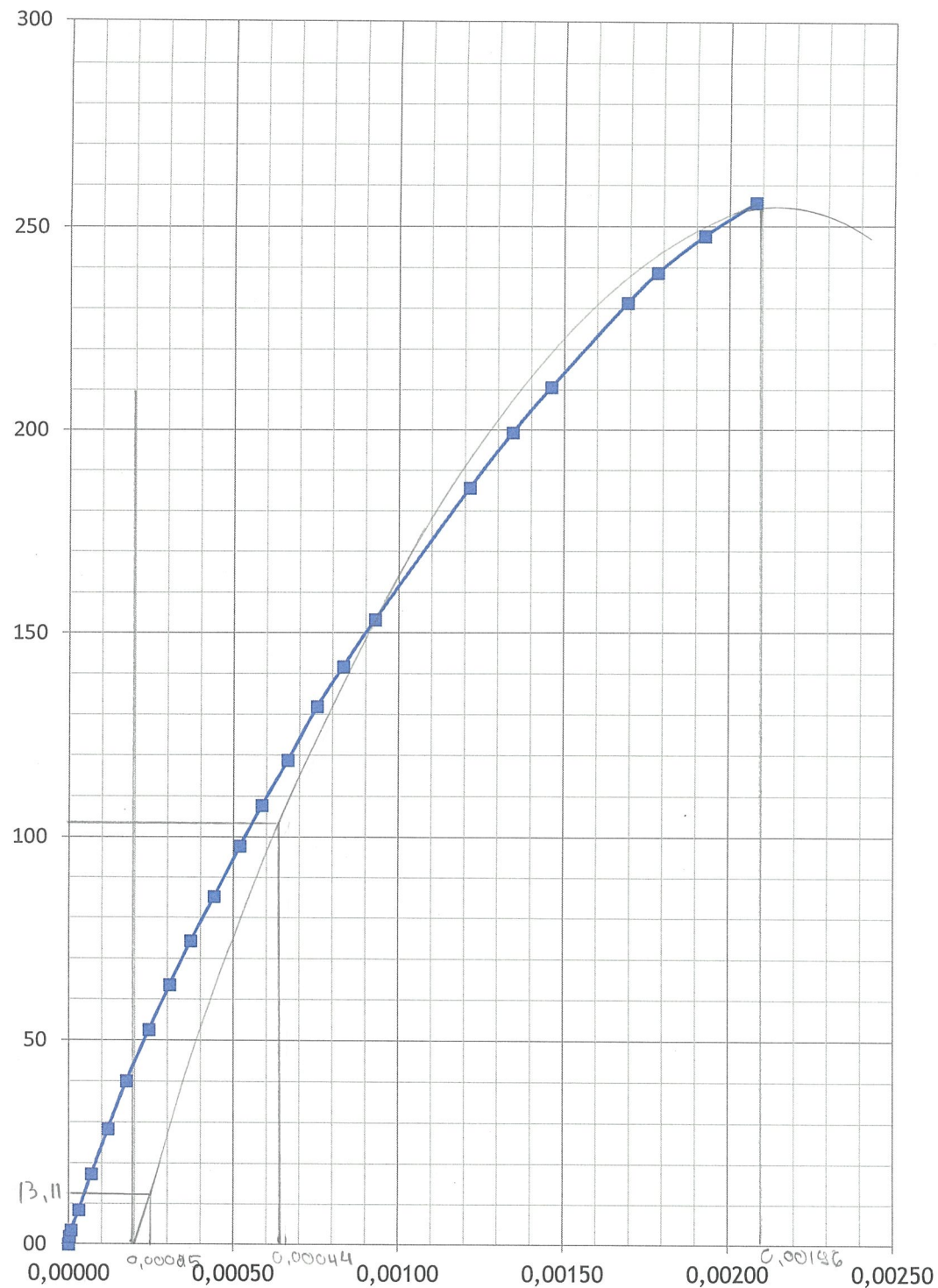
$$E_c (\text{cal}) = 16050.10 \text{ MPa}$$

240 - 0%

$$E_c = \frac{102,5 - 12,5}{0,00045 - 0,00005} = 223821,03$$

$$\alpha = \frac{22382103}{\sqrt{256,1}} = 13984,79$$

$$\alpha = 4270(2,226)^{1,5} = 14183,3$$



$$F'c_{max} = 256.0 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 J_{max} = 102.4 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 J_{max}} = 0,00055040 \text{ mm/mm}$$

$$J_{0,00005} = 13.1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

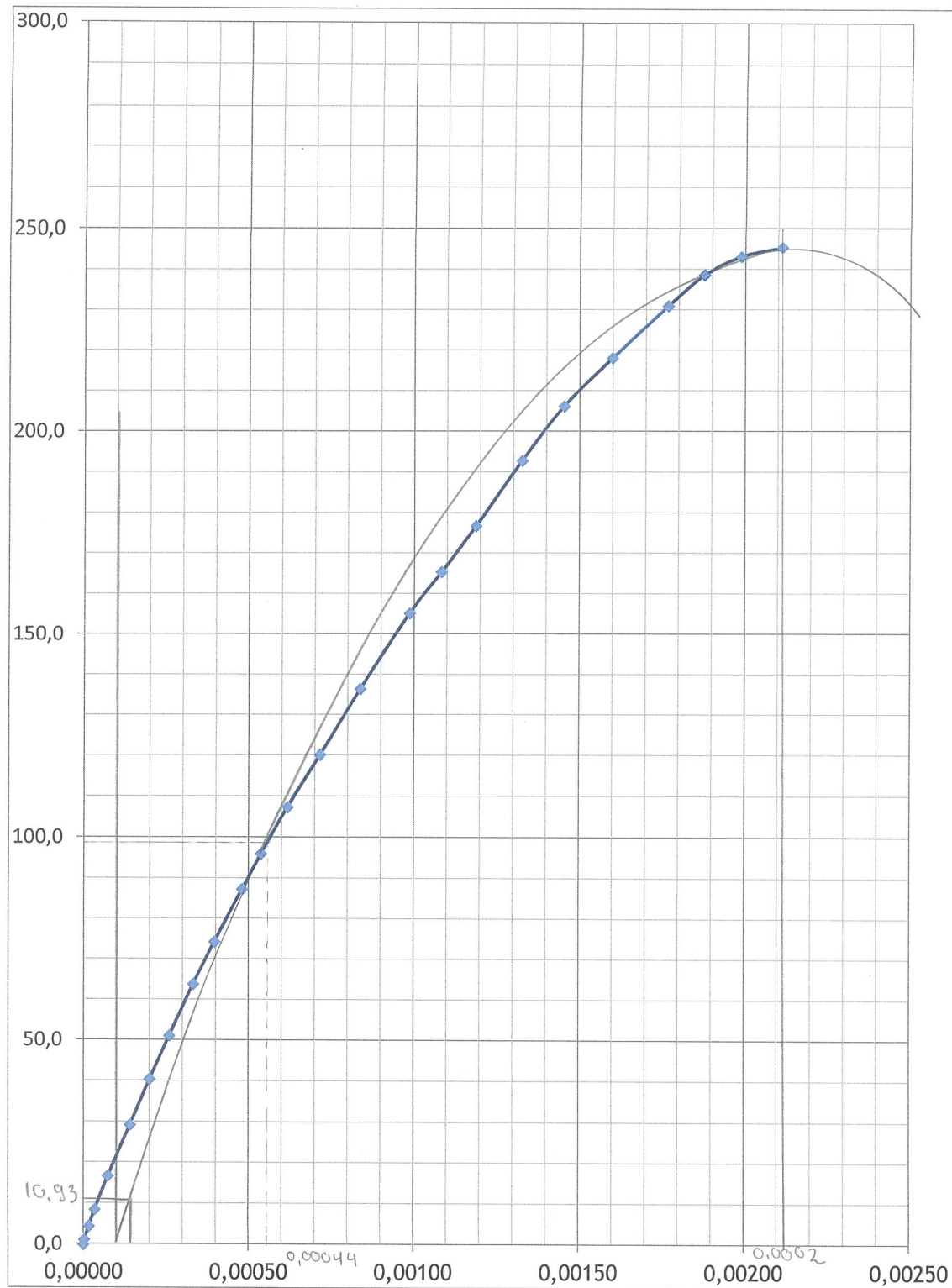
$$E_c (\text{cal}) = 17498.28 \text{ MPa}$$

240 - 0%

$$E_c = \frac{102,4 - 13,11}{0,00044 - 0,00005} = 228908,121$$

$$\alpha = \frac{223821,02}{\sqrt{256,0}} = 14307,53$$

$$\alpha = 4270 (2,237)^{1,5} = 14285,7$$



$$F'c_{max} = 246.1 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{max} = 98.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{max}} = 0,00055530 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 11.7 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

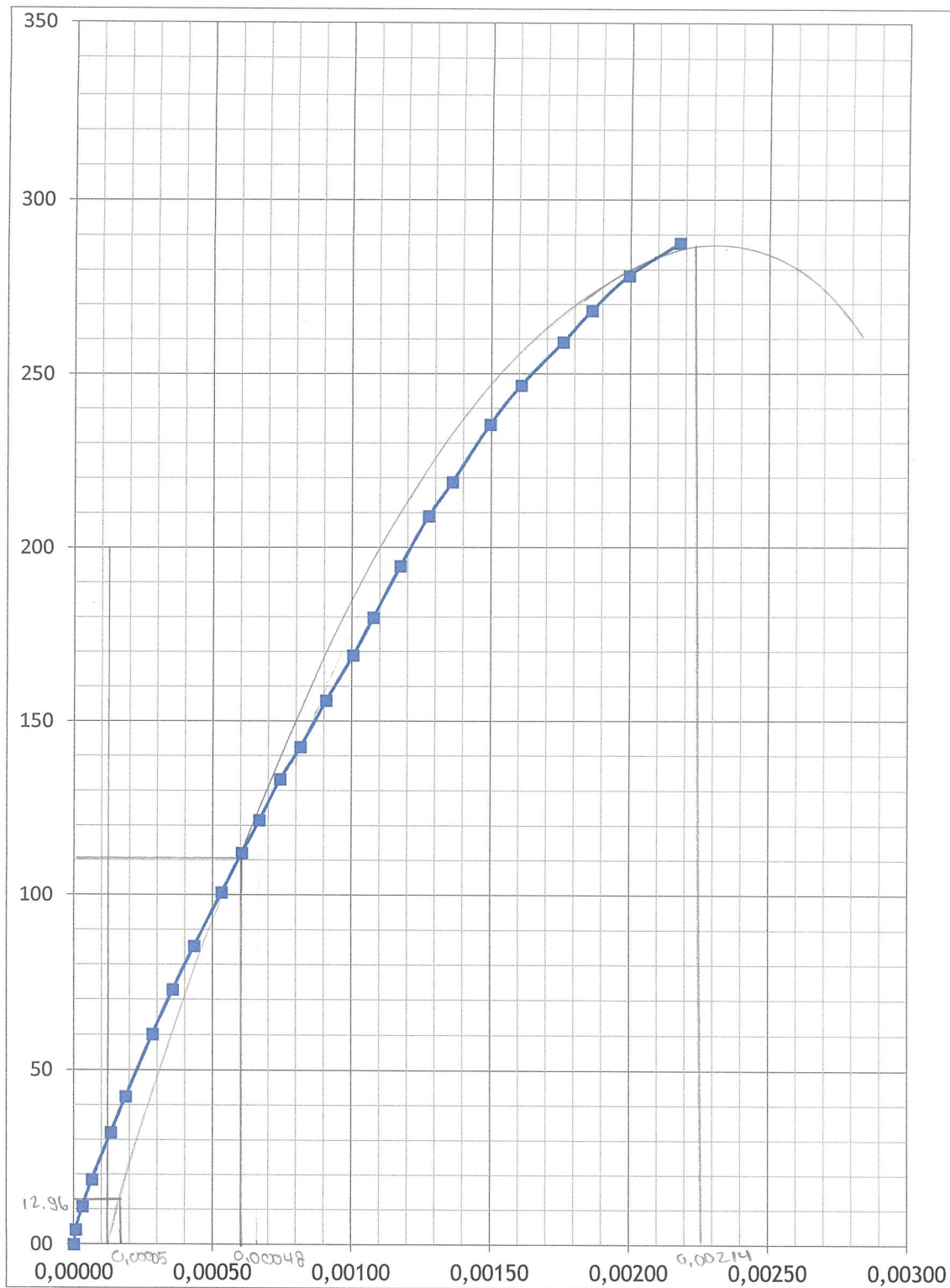
$$E_c (\text{cal}) = 16836.81 \text{ MPa}$$

240 - 0%

$$E_c = \frac{98.5 - 10.93}{0.00044 - 0.00005} = 223076.19$$

$$\alpha = \frac{223076.191}{\sqrt{246.1}} = 14219.06$$

$$\alpha = 4270 (2.227)^{1.5} = 14187.4$$



$$F'c \max = 279.6 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{\max} = 111.8 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{\max}} = 0,00060304 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 15.1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

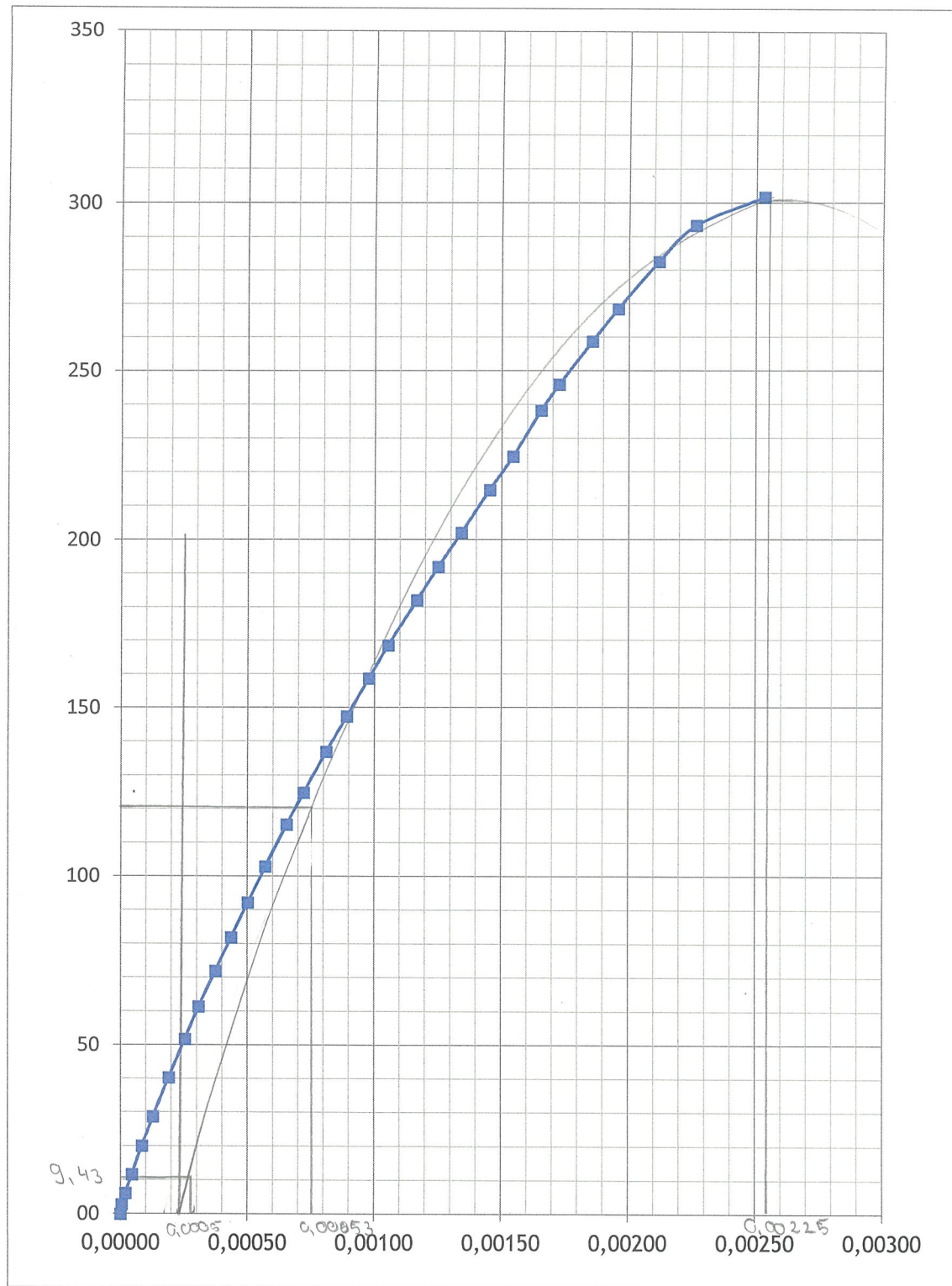
$$E_c (\text{cal}) = 17146.86,14 \text{ MPa}$$

240 - 5%

$$E_c = \frac{111.8 - 12.96}{0,00048 - 0,00005} = 231430,954$$

$$\alpha = \frac{231430,954}{\sqrt{279.6}} = 13840,095$$

$$\alpha = 4270 (2,181)^{1,5} = 13753,3$$



$$F'c_{max} = 301.7 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{max} = 120.7 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{max}} = 0,00069180 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 12.9 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

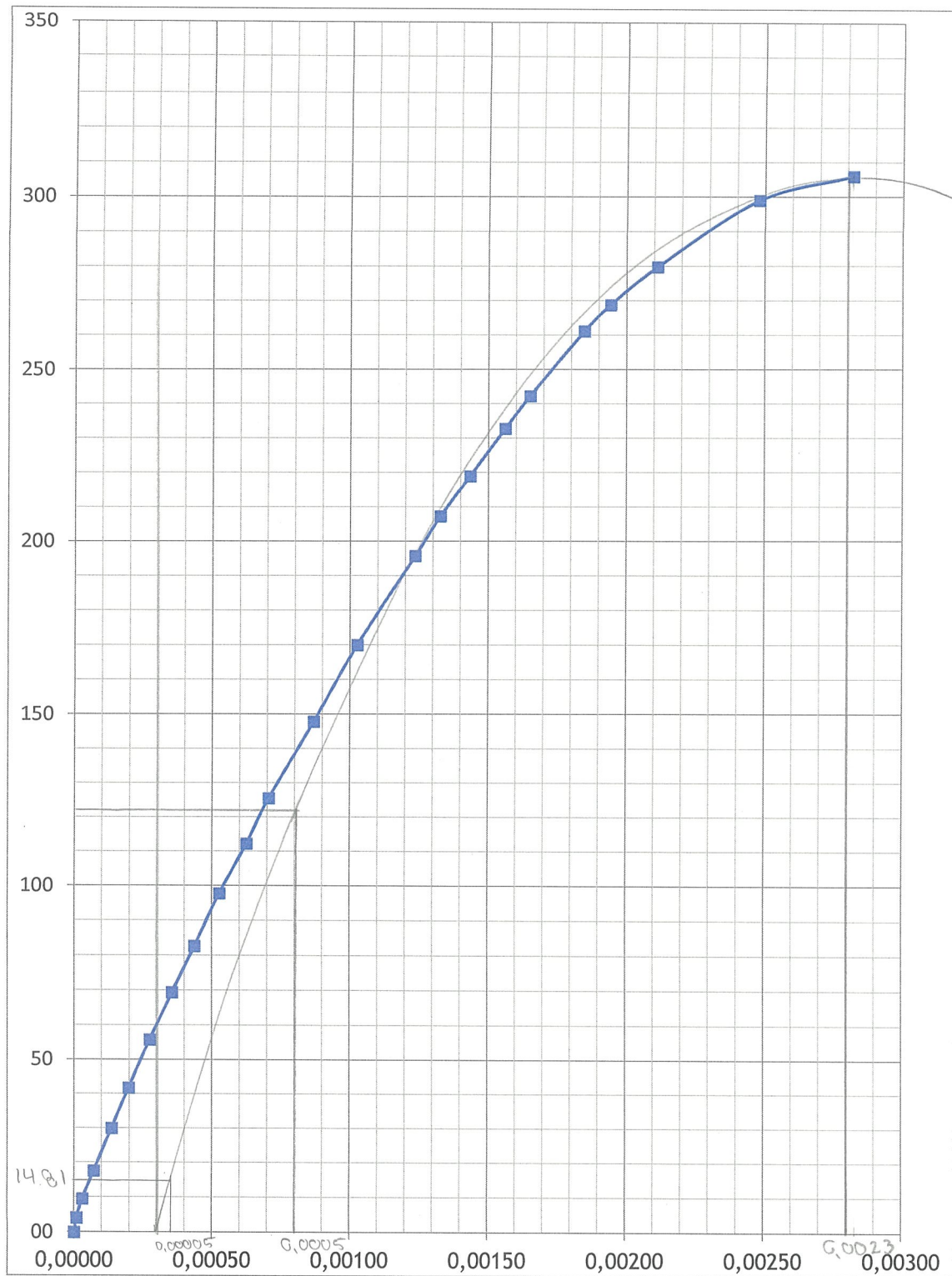
$$E_c (\text{cal}) = 16465.20 \text{ MPa}$$

240 - 5%

$$E_c = \frac{120,7 - 9,43}{0,00053 - 0,00005} = 234183,27$$

$$\alpha = \frac{234183,277}{\sqrt{301,7}} = 13482,9$$

$$\alpha = 4270 (2,190)^{1,5} = 13838,6$$



$$F'c \text{ max} = 303.5 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{\text{max}} = 121.4 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{\text{max}}} = 0,00068057 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 13,3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

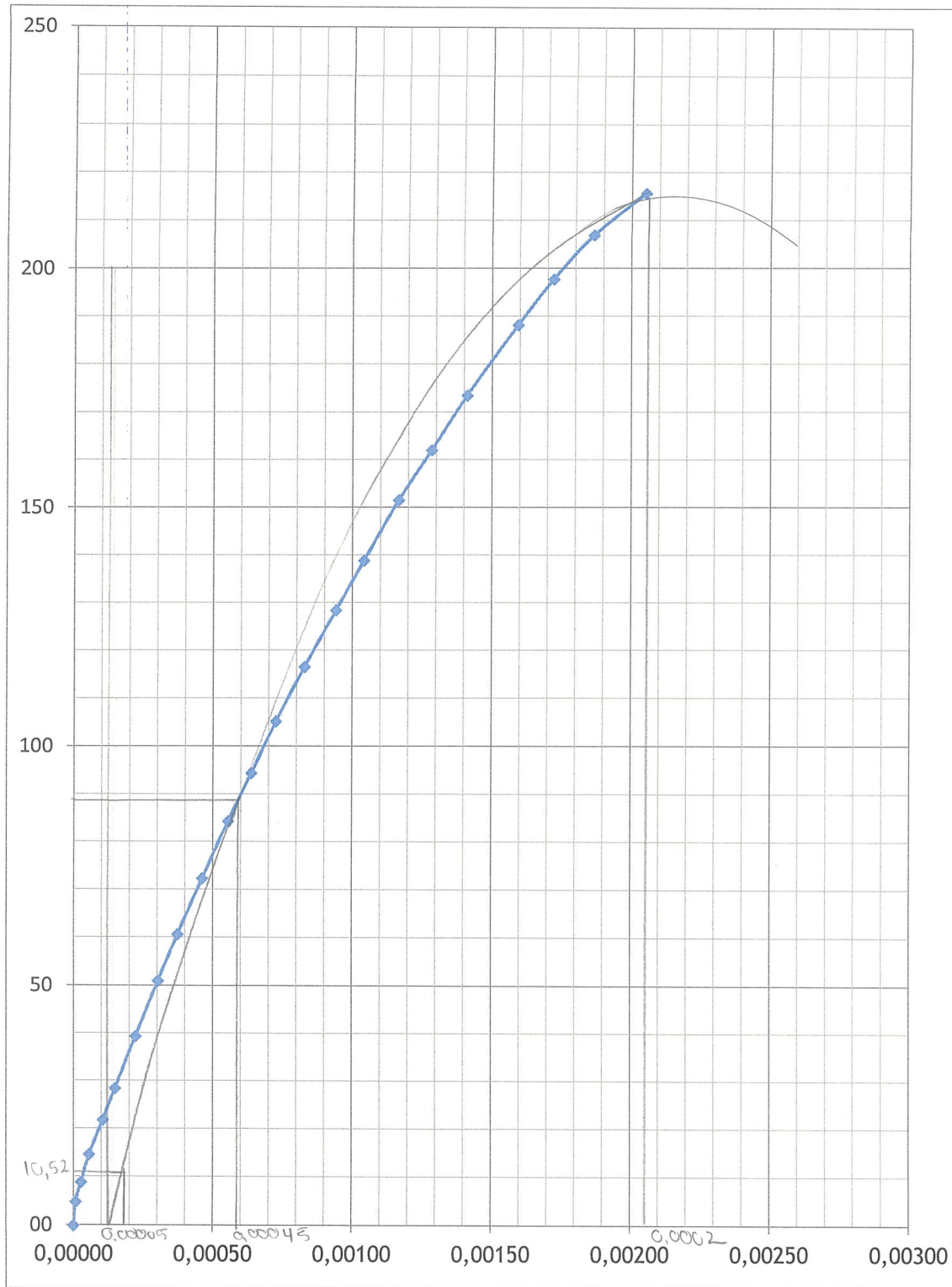
$$E_c (\text{cal}) = 16799.71 \text{ MPa}$$

240 - 5%

$$E_c = \frac{121,4 - 14,81}{0,0005 - 0,00005} = 236819,48$$

$$\alpha = \frac{236819,48}{\sqrt{303,5}} = 13594,63$$

$$\alpha = 4270 (2,191)^{1,5} = 13847,4$$



$$F'c_{max} = 221.4 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{max} = 88.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{max}} = 0,00058959 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 13.4 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

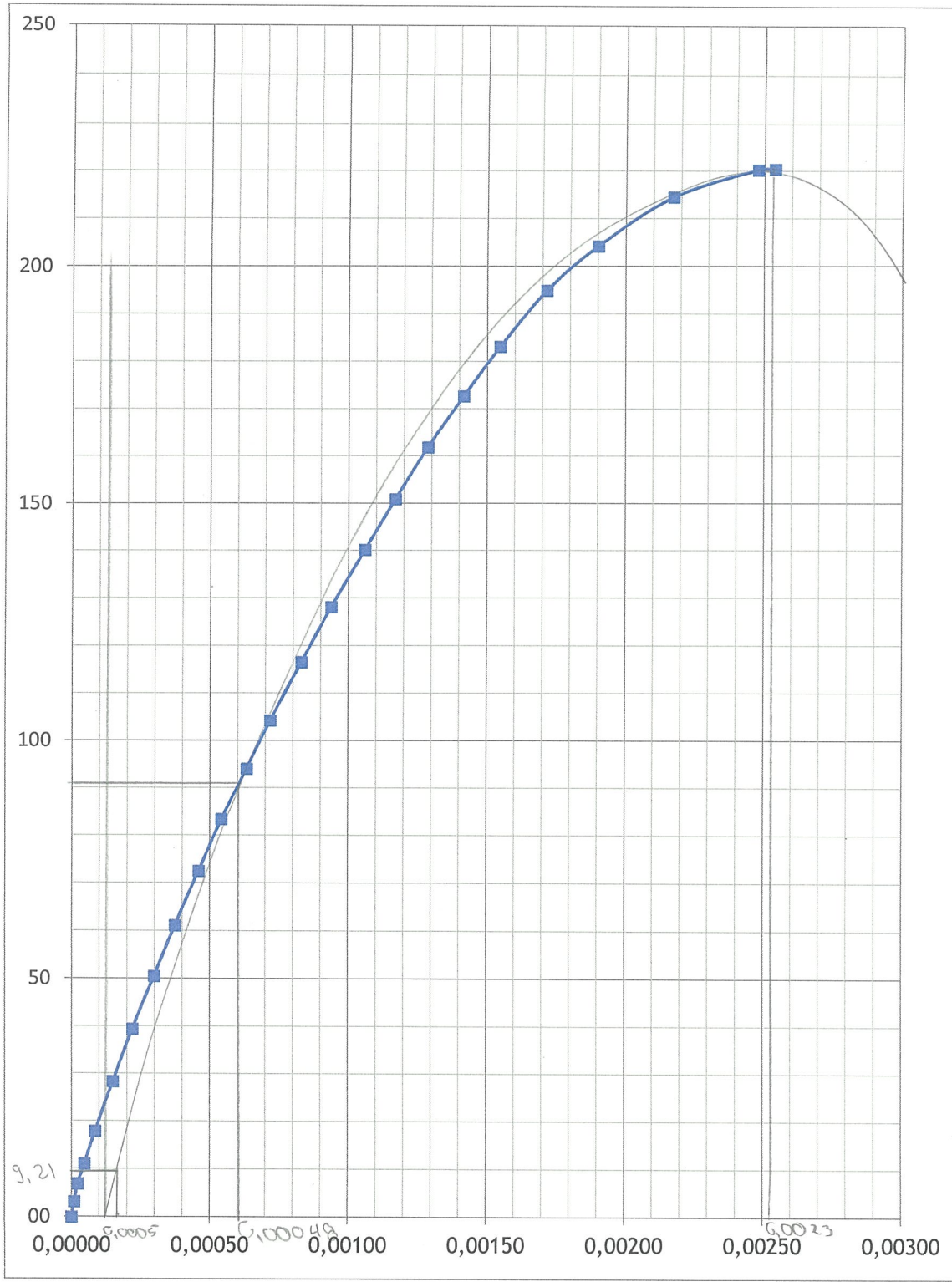
$$E_c (\text{cal}) = 13643.9897 \text{ MPa}$$

240 - 15%

$$E_c = \frac{88,5 - 10,52}{0,00045 - 0,00005} = 192846,53$$

$$\alpha = \frac{192846,53}{\sqrt{221,4}} = 12961,89$$

$$\alpha = 4270(2,093)^{1,5} = 12925,3$$



$$F'c \max = 229.4 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{\max} = 91.8 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{\max}} = 0,00061230 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 11.7 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

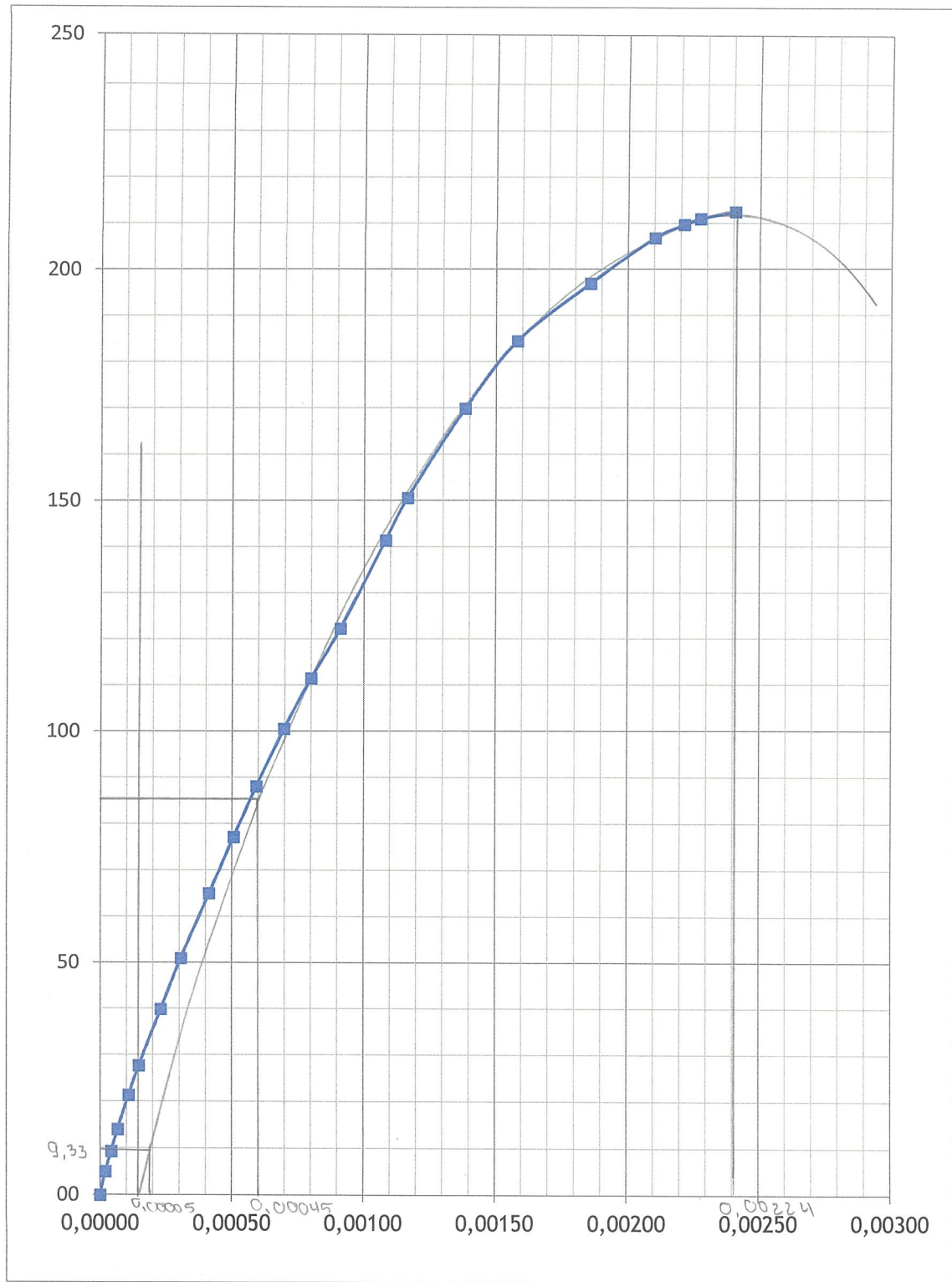
$$Ec (\text{cal}) = 13952.3629 \text{ MPa}$$

240 -15%

$$Ec = \frac{91.8 - 9.21}{0.00048 - 0.00005} = 193228.401$$

$$\alpha = \frac{193228.401}{\sqrt{229.4}} = 12756.93$$

$$\alpha = 4270 (2.106)^{1.5} = 13051.7$$



$$F'c_{max} = 212.4 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{max} = 85.0 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{max}} = 0,00056773 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 11.0 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

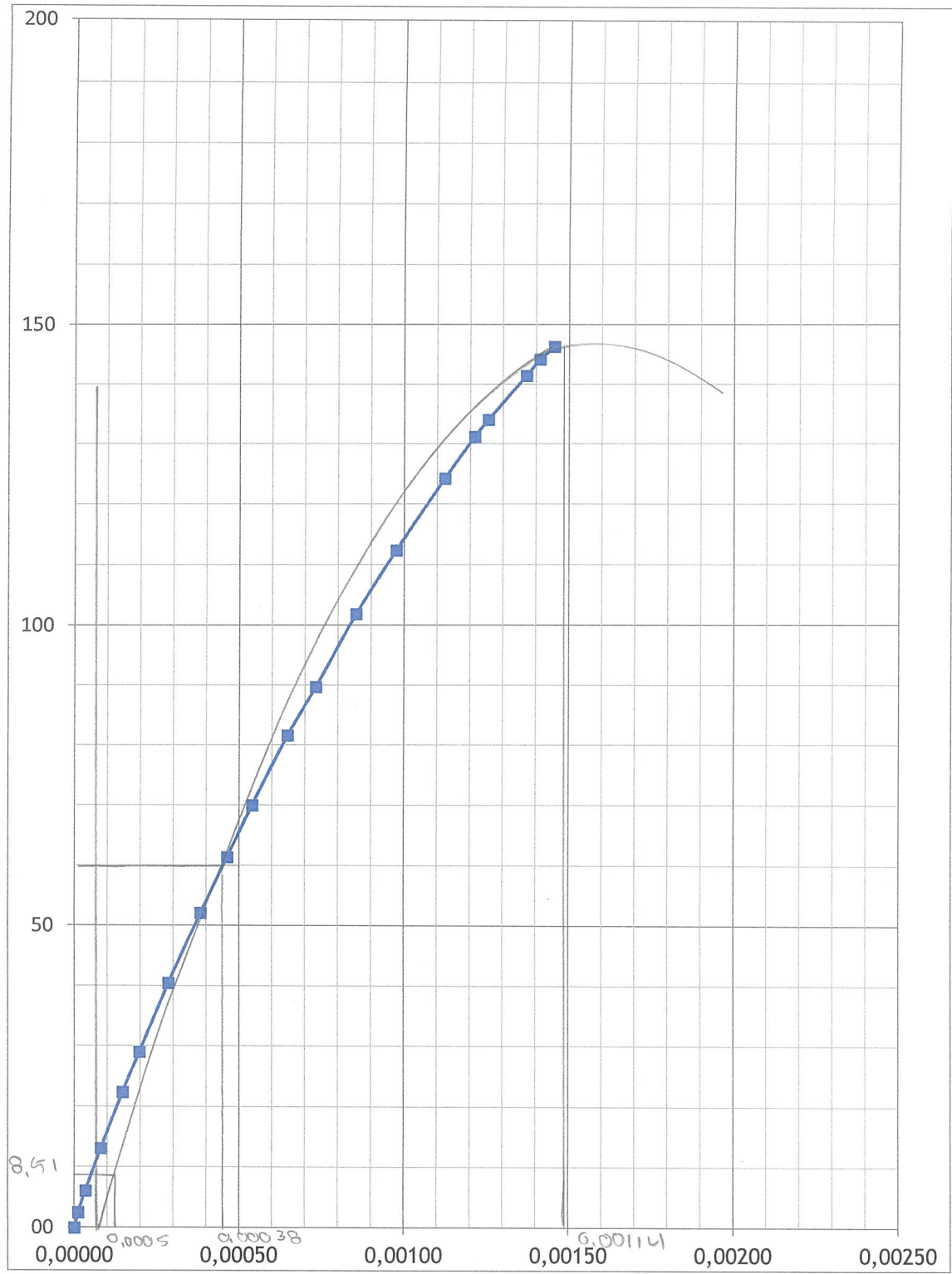
$$E_c (\text{cal}) = 14014.4654 \text{ MPa}$$

240 - 15%

$$E_c = \frac{85.0 - 9.33}{0,00045 - 0,00005} = 187989,494$$

$$\alpha = \frac{187989,494}{\sqrt{212,4}} = 12897,738$$

$$\alpha = 4270 (2,111)^{1,5} = 13093,3$$



$$F'c \max = 148.2 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{\max} = 59.3 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{\max}} = 0,00044585 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 8.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

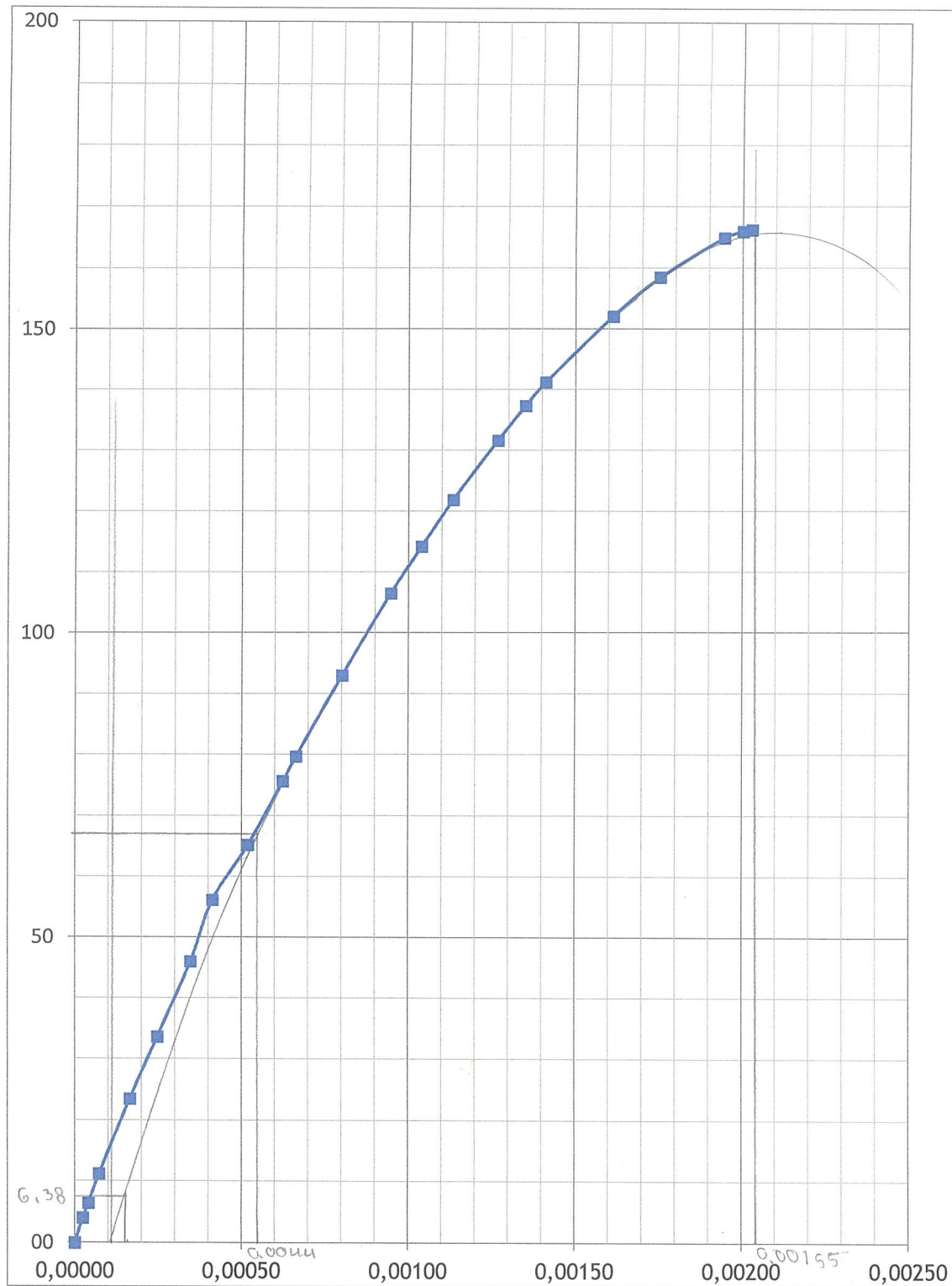
$$Ec (\text{cal}) = 12584.32 \text{ MPa}$$

240 - 25%

$$\bar{E}_c = \frac{59.3 - 8.51}{0.00038 - 0.00005} = 151776.98$$

$$\alpha = \frac{151776.98}{\sqrt{148.2}} = 12465.72$$

$$\alpha = 4270 (2.060)^{1.5} = 12625.8$$



$$F'c_{max} = 168.1 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{max} = 67.2 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\varepsilon_{0,4 T_{max}} = 0,00054005 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 7.7 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

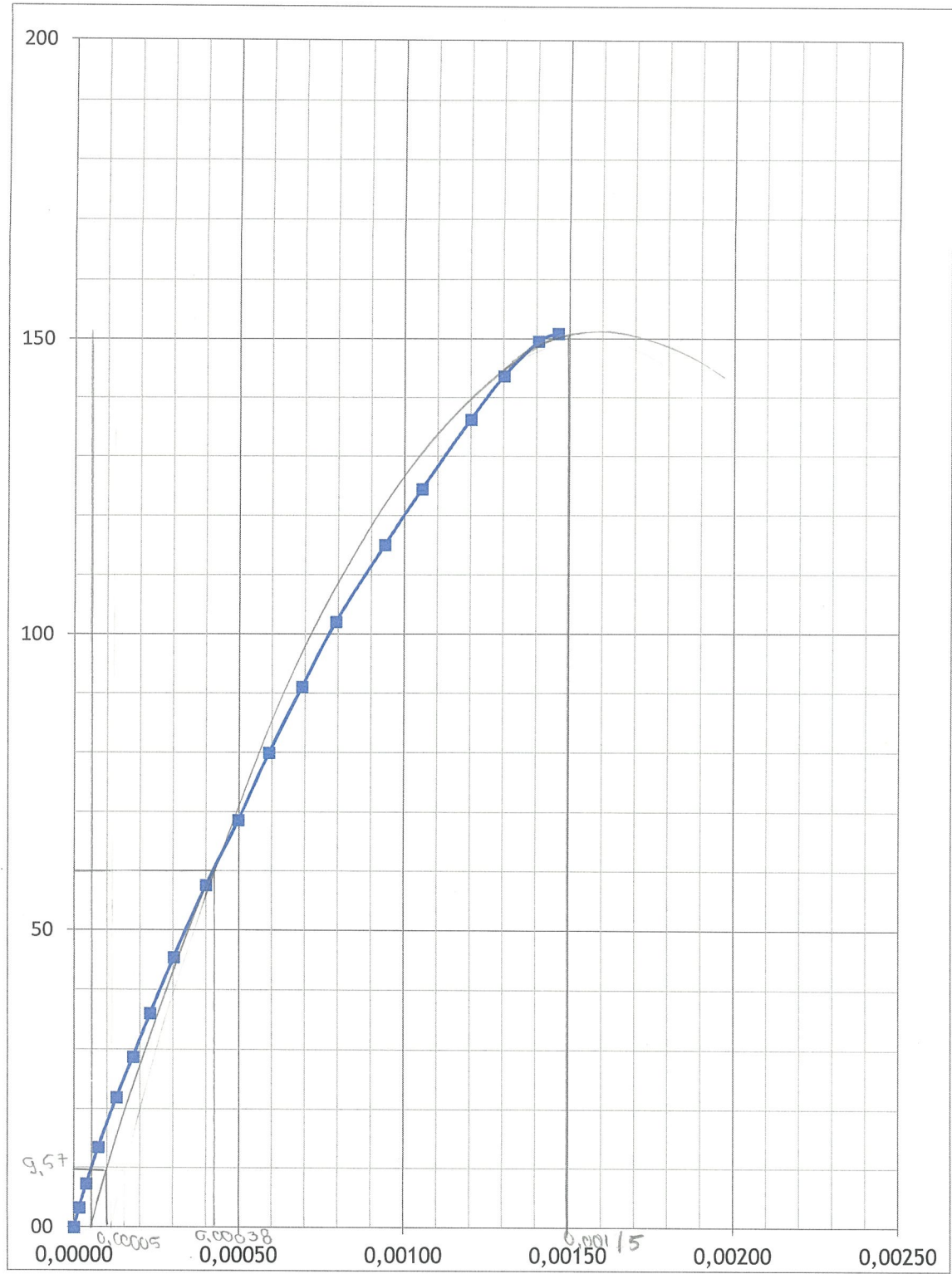
$$E_c (cal) = 11899.479 \text{ MPa}$$

240 - 25%

$$\bar{E}_c = \frac{67,2 - 6,38}{0,00044 - 0,00005} = 155098,57$$

$$\alpha = \frac{155098,57}{\sqrt{168,1}} = 11963,50$$

$$e = 4270 (2.048)^{1,5} = 12519,1$$



$$F'c \text{ max} = 150.9 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{\text{max}} = 60.4 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{\text{max}}} = 0,00042439 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 9.4 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

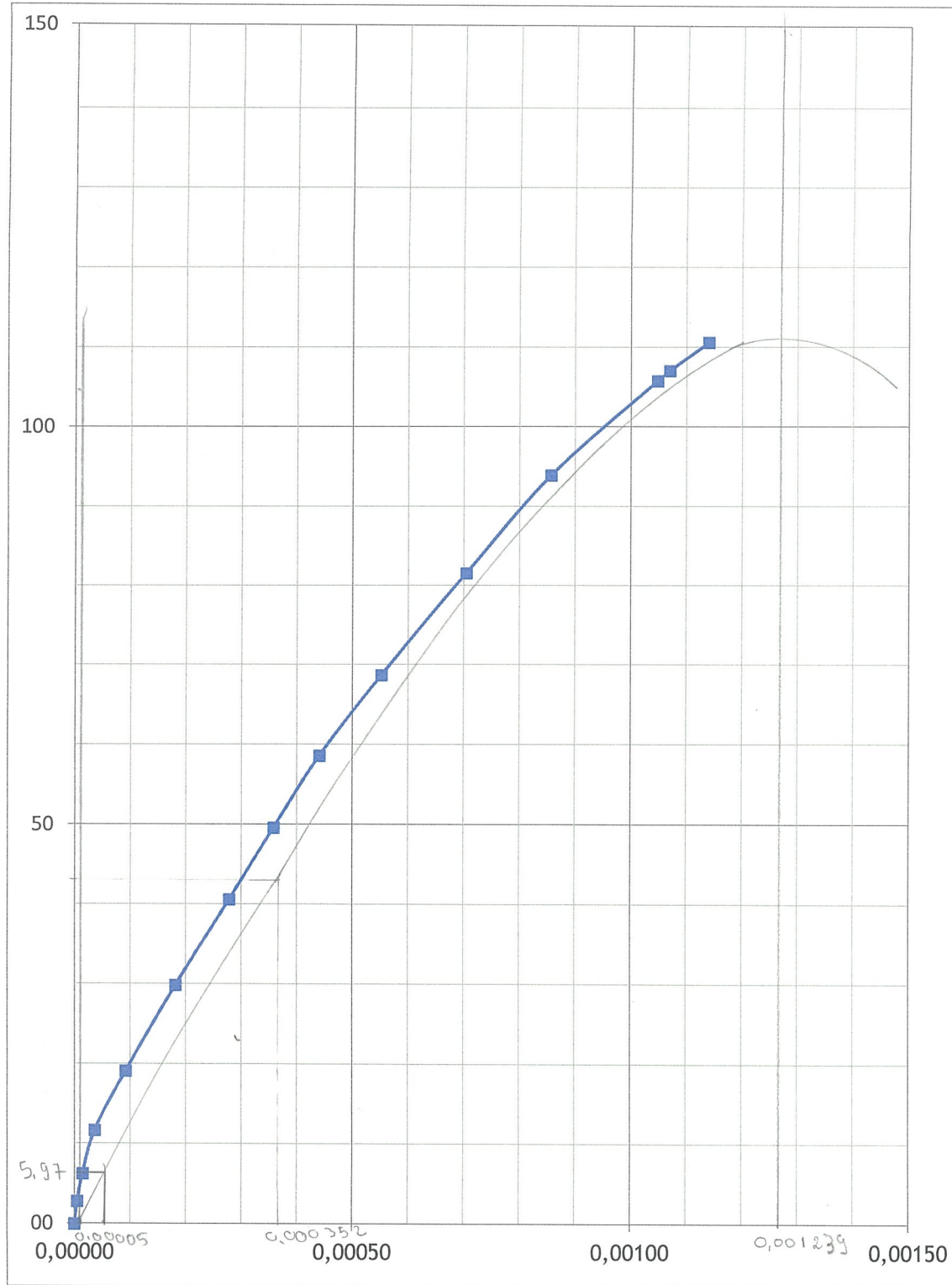
$$E_c (\text{cal}) = 13341.0757 \text{ MPa}$$

240 - 25%

$$E_c = \frac{60,4 - 9,57}{0,00038 - 0,00005} = 153422,627$$

$$\alpha = \frac{153490,52}{\sqrt{150,9}} = 12490,52$$

$$\alpha = 4270 (2,056)^{1,5} = 12585,6$$



$$F'c_{max} = 108.9 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{max} = 43.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{max}} = 0,00030449 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 13.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

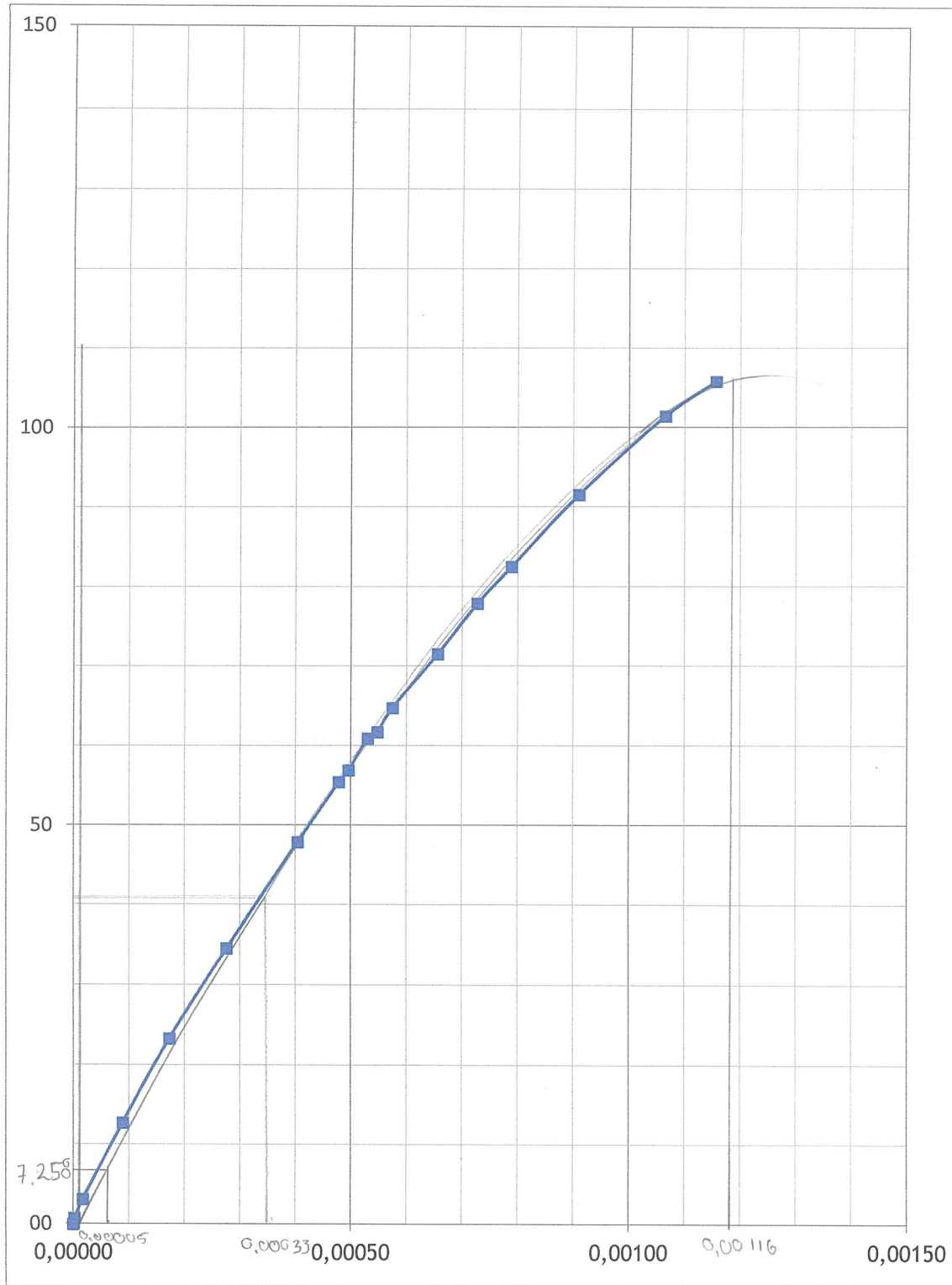
$$E_c (\text{cal}) = 1156.148 \text{ MPa}$$

240 - 35%

$$E_c = \frac{43,5 - 5,97}{0,000352 - 0,00005} = 124314,08$$

$$\alpha = \frac{124314,086}{\sqrt{108,9}} = 11914,38$$

$$\alpha = 4270 (2,011)^{1,5} = 12174,74$$



$$F'c \max = 104.2 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{\max} = 41.7 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{\max}} = 0,00034478 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 7.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

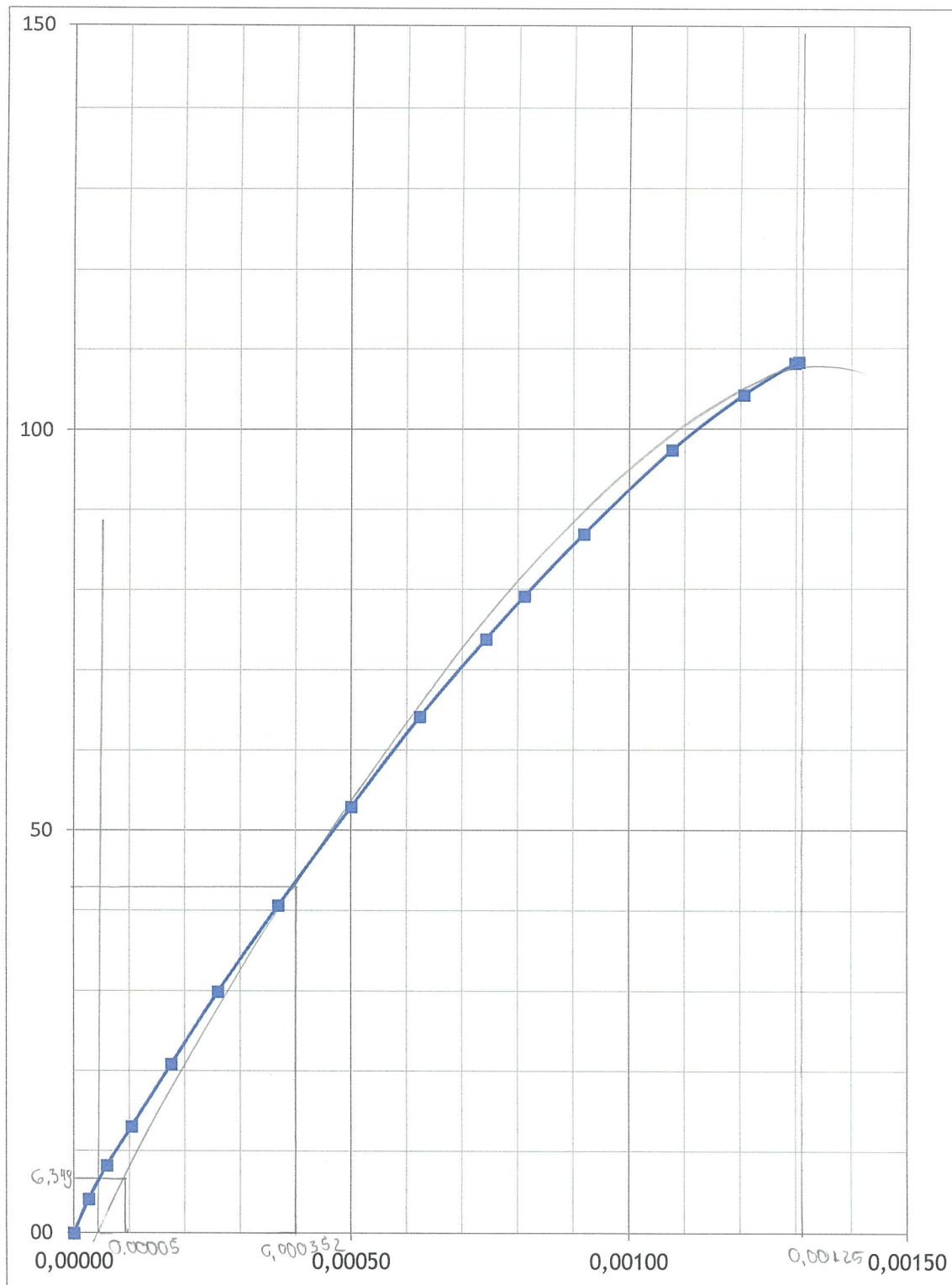
$$E_c (\text{cal}) = 11362.51 \text{ MPa}$$

240 - 35%

$$E_c = \frac{41.7 - 7.258}{0.00033 - 0.00005} = 123085.35$$

$$\alpha = \frac{123085.35}{\sqrt{104.2}} = 12059.94$$

$$\alpha = 4270 (2.006)^{1.5} = 12131.06$$



$$F'c_{max} = 108.7 \text{ kg/cm}^2$$

$$0,4 T_{max} = 43.5 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$\epsilon_{0,4 T_{max}} = 0,00039949 \text{ mm/mm}$$

$$T_{0,00005} = 7.1 \frac{\text{kg}}{\text{cm}^2}$$

$$E_c (\text{cal}) = 10219.49 \text{ MPa}$$

240 - 35%

$$E_c = \frac{43.5 - 6.349}{0.000352 - 0.00005} = 122867.76$$

$$\alpha = \frac{122867.76}{\sqrt{108.7}} = 11783.63$$

$$\alpha = 4270 (2.001)^{1.5} = 12082.44$$