

UNIVERSIDAD NACIONAL SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO
FACULTAD DE ARQUITECTURA E INGENIERIA CIVIL
ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL



TESIS

**“ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA ELABORACIÓN DE
VIGUETAS PRE ESFORZADAS CON AGREGADOS DE LA ZONA
DE CUSCO”**

PARA OPTAR EL TÍTULO PROFESIONAL DE INGENIERO CIVIL

PRESENTADO POR:

- BACH: JUAN ISRAEL TORRES JARA
- BACH. JORDY JOE QUILCA ZAMORA

DICTAMINANTES:

- M. SC. ING. JOSÉ FRANCISCO SERRANO FLORES
- PH. D. ING. AIDA ZAPATA DE CAMINO
- M. SC. ING. JUAN CARLOS MALPARTIDA LINARES

ASESOR:

- ING. ABEL AUCCA BARCENA

TESIS FINANCIADA POR LA UNSAAC

CUSCO – PERÚ – 2017

AGRADECIMIENTOS

A LA UNIVERSIDAD NACIONAL DE SAN ANTONIO ABAD DEL CUSCO:

Por formarnos y darnos la oportunidad de crecer intelectualmente. Del mismo modo, agradecer por el apoyo económico brindado para la realización de este trabajo de investigación.

A NUESTRA COMISION DICTAMINANTE

M. Sc. Ing. José Francisco Serrano Flores

Por los conocimientos brindados durante el proceso de formación universitaria, por los consejos y apoyo absolviendo las dudas generadas a lo largo del presente trabajo de tesis.

Ph. D. Ing. Aida Zapata De Camino

Por el tiempo, paciencia, ánimos, conocimientos e información brindados en este trabajo, así como también por el gran apoyo durante la revisión del mismo.

M. Sc. Ing. Juan Carlos Malpartida Linares

Por todos los conocimientos que nos brindó, la información que puso a nuestro alcance, por aclarar nuestro panorama y enfoque de investigación, por el tiempo y paciencia dedicados durante el proceso de revisión del presente trabajo de tesis,

A NUESTRO ASESOR

Ing. Abel Aucca Bárcena

Por el apoyo brindado durante el desarrollo de este trabajo de tesis.

Y a todas las personas que de una u otra manera colaboraron aportando sus conocimientos y opiniones para enriquecer esta investigación.

Jordy e Israel.

DEDICATORIA

Esta tesis la dedico:

A DIOS

*Por haberme dado la vida y permitirme el
haber llegado hasta este momento tan
importante de mi formación profesional.*

A MIS PADRES:

*Por ser el pilar más importante y por
demostrarme siempre su cariño y apoyo
incondicional sin importar las diferencias
de opiniones, los quiero.*

A MI HERMANO:

*Por la confianza brindada y los bellos
momentos que siempre pasamos juntos.*

*Jordy Joe
Quílca Zamora*

Esta tesis la dedico:

A DIOS

Por darme salud y a la mejor familia.

MIS PADRES

*Por apoyarme siempre y estar conmigo
en los buenos y malos momentos.*

MI HERMANA

*Por la confianza y el apoyo depositado
en mí y por ser un ejemplo a seguir.*

*Juan Israel
Torres Jara*

CONTENIDO

| | |
|---|-----------|
| RESUMEN DEL TRABAJO DE INVESTIGACION | 1 |
| ABSTRAC | 2 |
| INTRODUCCIÓN | 3 |
| CAPITULO I | 4 |
| 1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA..... | 4 |
| 1.1. Identificación del problema | 4 |
| 1.2. Formulación del problema objeto de investigación..... | 4 |
| 1.3. Delimitación y viabilidad de la investigación | 5 |
| 1.4. Objetivos de la investigación | 5 |
| 1.4.1. Objetivo General..... | 5 |
| 1.4.2. Objetivos Específicos | 5 |
| 1.5. Formulación de la hipótesis. | 6 |
| 1.6. Justificación e Importancia del problema | 6 |
| 1.7. Identificación de variables de estudio..... | 6 |
| CAPÍTULO II..... | 7 |
| 2. MARCO TEORICO CONCEPTUAL | 7 |
| 2.1. Viguetas Pre esforzadas | 7 |
| 2.1.1. Introducción | 7 |
| 2.1.2. Antecedentes..... | 8 |
| 2.1.3. Materiales | 11 |
| 2.1.3.1. Acero de alta resistencia | 11 |
| 2.1.3.1.1. Tipos de acero pre esforzado..... | 12 |
| 2.1.3.1.1.1. Alambres redondos..... | 13 |
| 2.1.3.1.1.2. Cable trenzado | 14 |
| 2.1.3.1.1.3. Varillas de acero de aleación | 15 |
| 2.1.3.1.2. Propiedades de esfuerzo-deformación del acero | 16 |

| | | |
|---------------------|---|-----------|
| 2.1.3.1.3. | Relajamiento del acero..... | 18 |
| 2.1.3.2. | Concreto de alta resistencia | 19 |
| 2.1.3.2.1. | Concreto sujeto a compresión uniaxial | 20 |
| 2.1.3.2.2. | Deformación en el concreto dependiente del tiempo..... | 22 |
| 2.1.4. | Diseño de viguetas pre esforzadas | 23 |
| 2.1.4.1. | Perdidas de pre esfuerzo | 23 |
| 2.1.4.1.1. | Clasificación de las perdidas | 23 |
| 2.1.4.1.1.1. | Perdidas por deslizamiento en el anclaje (PDA)..... | 24 |
| 2.1.4.1.1.2. | Perdida por acortamiento elástico del concreto (PAE) | 24 |
| 2.1.4.1.1.3. | Pérdidas por flujo plástico (PFP) | 25 |
| 2.1.4.1.1.4. | Perdidas por contracción del concreto (PRC) | 25 |
| 2.1.4.1.1.5. | Perdidas por relajamiento del acero (PRA) | 27 |
| 2.1.4.2. | Análisis y diseño de las viguetas pre esforzadas..... | 27 |
| 2.1.4.2.1. | Análisis y diseño bajo flexión | 27 |
| 2.1.4.2.1.1. | Análisis bajo esfuerzos permisibles..... | 28 |
| 2.1.4.2.1.2. | Esfuerzos permisibles en el concreto | 30 |
| 2.1.4.2.1.3. | Esfuerzos permisibles en el acero..... | 31 |
| 2.1.4.2.2. | Criterios de diseño..... | 31 |
| 2.1.4.2.3. | Revisión del agrietamiento | 32 |
| 2.1.4.2.4. | Análisis y diseño por resistencia a la ruptura..... | 33 |
| 2.1.4.2.4.1. | Calculo del momento resistente por compatibilidad de deformaciones | |
| | 35 | |
| 2.1.4.2.4.2. | Calculo del momento resistente con ecuaciones del ACI | 36 |
| 2.1.4.2.5. | Revisión por cortante | 38 |
| 2.1.4.2.6. | Revisión de las deflexiones..... | 39 |
| 2.1.5. | Procesos de elaboración..... | 41 |
| 2.1.5.1. | Proceso de elaboración de viguetas artesanales | 41 |

| | |
|---|-----------|
| 2.1.5.1.1. Preparación del molde | 41 |
| 2.1.5.1.2. Corte del alambre..... | 42 |
| 2.1.5.1.3. Colocación del alambre y separadores | 42 |
| 2.1.5.1.4. Anclaje de alambre..... | 43 |
| 2.1.5.1.5. Tensado de alambre | 44 |
| 2.1.5.1.6. Fabricación del concreto..... | 44 |
| 2.1.5.1.7. Vaciado del concreto | 45 |
| 2.1.5.1.8. Vibrado del concreto, acabado y colocación de ganchos. | 45 |
| 2.1.5.1.9. Curado del concreto | 47 |
| 2.1.5.1.10. Destensado del alambre y cortes | 48 |
| 2.1.5.1.11. Descimbrado de la vigueta..... | 48 |
| 2.1.5.1.12. Acarreo y almacenaje..... | 49 |
| 2.1.5.2. Proceso de elaboración de viguetas industriales. | 50 |
| 2.2. El Concreto..... | 55 |
| 2.2.1. Componentes del concreto | 56 |
| 2.2.1.1. El cemento | 56 |
| 2.2.1.2. El Agua..... | 59 |
| 2.2.1.3. Los Agregados | 59 |
| 2.2.1.3.1. Agregado fino: | 60 |
| 2.2.1.3.2. Agregado grueso:..... | 60 |
| 2.2.1.3.3. Módulo de fineza | 61 |
| 2.2.1.3.4. Tamaño máximo:..... | 61 |
| 2.2.1.3.5. Tamaño máximo nominal:..... | 61 |
| 2.2.2. Propiedades del concreto..... | 61 |
| 2.2.2.1. La trabajabilidad | 61 |
| 2.2.2.2. La consistencia | 62 |
| 2.2.2.3. La resistencia..... | 63 |

| | |
|--|-----------|
| 2.2.2.4. La impermeabilidad | 64 |
| 2.2.2.5. La durabilidad..... | 64 |
| CAPÍTULO III | 67 |
| 3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN | 67 |
| 3.1. Tipo de investigación..... | 67 |
| 3.2. Nivel de investigación | 68 |
| 3.3. Diseño de investigación | 69 |
| 3.4. Población y muestra | 70 |
| 3.4.1. Población..... | 70 |
| 3.4.2. Muestra | 70 |
| 3.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos..... | 71 |
| 3.5.1. Extracción y preparación de muestras | 71 |
| 3.5.2. Cantidad de material fino que pasa por el TAMIZ N° 200 | 72 |
| 3.5.3. Peso unitario y vacío de los agregados | 74 |
| 3.5.4. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos | 75 |
| 3.5.5. Gravedad específica y absorción de agregados finos..... | 76 |
| 3.5.6. Peso específico y absorción en agregados gruesos | 78 |
| 3.5.7. Ensayo de tracción directa a varillas de acero (límite de fluencia) | 80 |
| 3.5.8. Resistencia a la compresión axial del concreto de diseño..... | 80 |
| 3.5.9. Pruebas a flexión utilizando la maquina universal..... | 80 |
| 3.5.10. Prueba de flexión en campo. | 81 |
| 3.5.11. Encuestas. | 81 |
| 3.6. Tratamiento estadístico..... | 82 |
| CAPÍTULO IV | 84 |
| 4. CONTROL DE CALIDAD DE LOS MATERIALES | 84 |
| 4.1. Canteras utilizadas para diseño de mezclas en la ciudad de Cusco..... | 84 |
| 4.1.1. Características de las canteras..... | 84 |

| | | |
|-----------------|---|------------|
| 4.1.1.1. | Cantera de Vilcabamba..... | 84 |
| 4.1.1.2. | Cantera de Huandar | 85 |
| 4.1.2. | Clasificación de las canteras según su procedencia geológica. | 85 |
| 4.1.2.1. | Cantera de Vilcabamba..... | 86 |
| 4.1.2.2. | Cantera de Huandar | 86 |
| 4.2. | Parámetros limite recomendados por la ASTM | 87 |
| 4.2.1. | El agua | 87 |
| 4.2.2. | Agregado grueso | 88 |
| 4.2.3. | Agregado fino | 89 |
| 4.3. | Estudio de los agregados | 90 |
| 4.3.1. | Agregado fino y grueso..... | 90 |
| 4.3.1.1. | Absorción de agregado | 90 |
| 4.3.1.2. | Contenido de humedad del agregado..... | 91 |
| 4.3.1.3. | Peso específico | 91 |
| 4.3.1.4. | Análisis granulométrico | 91 |
| 4.3.1.5. | Peso unitario | 92 |
| 4.3.1.6. | Cantidad de material fino que pasa el tamiz n° 200 | 92 |
| 4.4. | DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO | 92 |
| 4.4.1. | Aspecto teórico del diseño | 93 |
| 4.4.2. | Información requerida para el diseño de mezclas | 96 |
| 4.4.2.1. | Alcance | 96 |
| 4.4.2.2. | Cemento | 97 |
| 4.4.2.3. | Agua | 97 |
| 4.4.2.4. | Agregados | 97 |
| 4.4.2.5. | Tablas de diseño de mezclas..... | 97 |
| 4.4.2.6. | Método del comité 211 ACI..... | 100 |
| 4.4.2.7. | Proporcionamiento de los componentes..... | 100 |

| | | |
|-------------------------|--|------------|
| 4.4.2.7.1. | Pasos del método del comité 211 del ACI..... | 100 |
| 4.4.2.7.2. | Proporcionamiento de los agregados..... | 101 |
| 4.4.3. | Diseño de mezcla para la fabricación de viguetas pre esforzadas con agregados de la zona de Cusco. | 101 |
| 4.5. | ENsayos DEL CONCRETO | 107 |
| 4.5.1. | Resistencia a la compresión axial del concreto de diseño..... | 107 |
| 4.6. | ACERO DE ALTA RESISTENCIA | 110 |
| 4.6.1. | Ensayo de tracción directa a varillas de acero (límite de fluencia) | 110 |
| CAPÍTULO V | | 116 |
| 5. | MAQUINAS Y HERRAMIENTAS..... | 116 |
| 5.1.1. | Moldes de acero..... | 116 |
| 5.1.2. | Máquina para pretensar acero. | 119 |
| 5.1.3. | Cuñas y anclajes..... | 124 |
| 5.1.3.1. | Cuñas..... | 124 |
| 5.1.3.2. | Anclaje. | 126 |
| CAPÍTULO VI..... | | 128 |
| 6. | DISEÑO DE VIGUETAS PRE ESFORZADAS (MEMORIA DE CÁLCULO). | |
| | 128 | |
| 6.1. | Propiedades de la viga..... | 128 |
| 6.1.1. | Propiedades del concreto..... | 128 |
| 6.1.2. | Propiedades de la sección de la viga | 128 |
| 6.1.3. | Condiciones de Pre esfuerzo | 130 |
| 6.2. | Perdidas de pre esfuerzo | 131 |
| 6.2.1. | Clasificación de las perdidas | 131 |
| 6.2.2. | Perdidas por flujo plástico (PFP) | 131 |
| 6.2.2.1. | Perdidas por deslizamiento en el anclaje (PDA) | 132 |
| 6.2.2.2. | Perdida por acortamiento elástico del concreto (PAE) | 133 |
| 6.2.2.3. | Perdidas por contracción del concreto (PRC)..... | 134 |

| | |
|---|------------|
| 6.2.2.4. Perdidas por relajamiento del acero (PRA) | 136 |
| 6.3. Análisis y diseño de las viguetas pre esforzadas. | 137 |
| 6.3.1. Análisis y diseño bajo flexión..... | 137 |
| 6.3.1.1. Análisis bajo esfuerzos permisibles | 137 |
| 6.3.1.1.1. Esfuerzos permisibles en el concreto | 142 |
| 6.3.1.2. Análisis y diseño por resistencia a la ruptura | 144 |
| 6.3.1.2.1. Calculo del momento resistente usando ecuaciones ACI..... | 144 |
| 6.3.2. Revisión por cortante..... | 146 |
| 6.3.3. Revisión de las deflexiones | 147 |
| CAPÍTULO VII | 150 |
| 7. METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE VIGUETAS PRE ESFORZADAS EN CUSCO..... | 150 |
| 7.1. Proceso de elaboración de las viguetas pre esforzadas | 150 |
| 7.1.1. Preparación y ubicación del lugar de trabajo | 150 |
| 7.1.2. Colocación de moldes para viguetas pre esforzadas..... | 150 |
| 7.1.3. Instalación de la maquina pre tensora artesanal | 151 |
| 7.1.4. Colocación de anclajes y seguros | 152 |
| 7.1.5. Fabricación de mecanismos de sujeción | 152 |
| 7.1.6. Colocación del acero | 153 |
| 7.1.7. Tensado del acero..... | 153 |
| 7.1.8. Vaciado de concreto..... | 154 |
| 7.1.9. Destensado y desencofrado | 154 |
| 7.1.10. Corte y curado..... | 155 |
| 7.2. Resistencia a la compresión axial de testigos de concreto tomados durante la fabricación de viguetas pre esforzadas | 156 |
| 7.3. Pruebas a flexión en viguetas pre esforzadas..... | 159 |
| 7.3.1. Pruebas a flexión utilizando la maquina universal..... | 159 |
| 7.3.2. Prueba de deflexión en campo..... | 162 |

| | |
|--|------------|
| CAPÍTULO VIII | 167 |
| 8. ESTUDIO DE MERCADO | 167 |
| 8.1.1. Análisis histórico del mercado | 167 |
| 8.1.2. Proveedores | 167 |
| 8.1.3. Competencia | 168 |
| 8.1.4. Características de las viguetas pre esforzadas Supermix..... | 170 |
| 8.2. El Producto..... | 175 |
| 8.3. Análisis de la demanda..... | 176 |
| 8.3.1. Desarrollo del modelo de encuesta | 176 |
| 8.4. Análisis de costo de fabricación de las viguetas pre esforzadas. | 178 |
| 8.4.1. Materiales | 179 |
| 8.4.2. Mano de obra | 179 |
| 8.4.3. Equipo | 179 |
| 8.5. Análisis de la situación proyectada | 182 |
| CAPÍTULO IX..... | 183 |
| 9. ANALISIS DE RESULTADOS | 183 |
| 9.1. Resultados de agregados. | 183 |
| 9.1.1. Tablas resumen por cantera estudiada..... | 183 |
| 9.1.2. Tabla resumen por cantera de agregado fino | 184 |
| 9.1.3. Tabla resumen por cantera agregado grueso..... | 187 |
| 9.2. Resultados del concreto..... | 190 |
| 9.3. Resultados del acero de alta resistencia..... | 194 |
| 9.3.1. Resultados del ensayo a tracción directa. | 194 |
| 9.4. Resultados de ensayos en viguetas pre esforzadas..... | 199 |
| 9.4.1. Resistencia a la compresión axial de testigos de concreto tomados durante la fabricación de viguetas pre esforzadas | 199 |
| 9.4.2. Resultados en flexión de viguetas pre esforzadas en laboratorio. | 203 |

| | |
|--|------------|
| 9.4.3. Resultados en flexión de viguetas pre esforzadas en campo | 206 |
| 9.5. Resultados del estudio de mercado | 208 |
| CAPÍTULO X | 212 |
| 10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES | 212 |
| 10.1. Conclusiones..... | 212 |
| 10.2. Recomendaciones..... | 214 |
| BIBLIOGRAFÍA | 215 |
| ANEXOS | 217 |

CUADRO DE FIGURAS

| | |
|--|----|
| Figura 1. Efecto de la contracción y el flujo plástico del concreto en la reducción de la fuerza pretensora. (a) Miembro del concreto axialmente pre esforzado (b) Esfuerzo del acero..... | 12 |
| Figura 2. Esfuerzos producidos por el pre esfuerzo inicial | 28 |
| Figura 3. Esfuerzos producidos por pre esfuerzo y peso propio..... | 29 |
| Figura 4. Esfuerzos producidos por el pre esfuerzo y las cargas de servicio | 30 |
| Figura 5. Fuerzas internas en una viga pre esforzada | 34 |
| Figura 6. Análisis de deformaciones en una viga pre esforzada | 35 |
| Figura 7. Grietas por flexión y corte en una viga pre esforzada..... | 38 |
| Figura 8. Grietas por cortante en el alma | 39 |
| Figura 9. Preparación del molde. (De-Acero, 2010) | 42 |
| Figura 10. Corte del alambre a la longitud deseada. (De-Acero, 2010)..... | 42 |
| Figura 11. Colocación del alambre en los moldes. (De-Acero, 2010)..... | 43 |
| Figura 12. Colocación de separadores. (De-Acero, 2010) | 43 |
| Figura 13. Anclajes del alambre mediante cuñas. (De-Acero, 2010) | 44 |
| Figura 14. Tensado del alambre, por medio de un equipo hidráulico. (De-Acero, 2010)..... | 44 |
| Figura 15. Fabricación del concreto para las viguetas pre esforzadas. (De-Acero, 2010)..... | 45 |
| Figura 16. Vaciado del concreto. (De-Acero, 2010) | 45 |
| Figura 17. Vibrado del concreto de la viga pre esforzada. (De-Acero, 2010).... | 46 |

| | |
|--|------------|
| Figura 18. Proceso de acabado de la vigueta pre esforzada. (De-Acero, 2010) | 46 |
| Figura 19. Colocación de los ganchos de alambre. (De-Acero, 2010) | 47 |
| Figura 20. Destensado del alambre pre esforzado. (De-Acero, 2010) | 48 |
| Figura 21. Descimbrado de las viguetas. (De-Acero, 2010) | 49 |
| Figura 22. Almacenado de las viguetas pre esforzadas. (De-Acero, 2010) | 50 |
| Figura 23. Limpieza de la pista de trabajo (Vigueta industrial). | 50 |
| Figura 24. Aplicación del aditivo desmoldante. | 51 |
| Figura 25. Colocación del alambre de alta resistencia. | 51 |
| Figura 26. Pre tensado mediante las gatas hidráulicas. | 52 |
| Figura 27. Vaciado del concreto sobre la pista, mediante una máquina extrusora. | 52 |
| Figura 28. Colocación de una fibra de polipropileno para el curado a vapor correspondiente..... | 53 |
| Figura 29. Destensado de las viguetas pre esforzadas. | 53 |
| Figura 30. Corte de las viguetas pre esforzadas. | 54 |
| Figura 31. Traslado de las viguetas pre esforzadas cortadas. | 54 |
| Figura 32. Almacenamiento de las viguetas pre esforzadas. | 55 |
| Figura 33. Mapa de localización de la Cantera Vilcabamba. | 84 |
| Figura 34. Mapa de localización de la Cantera de Huandar. | 85 |
| Figura 35. Ensayo a tracción de los alambres de alta resistencia. | 111 |
| Figura 36. Maquina Tensyland | 117 |
| Figura 37. Maquina extrusora Tensyland | 117 |
| Figura 38. Molde de la sección de la vigueta pre esforzada..... | 118 |
| Figura 39. Doblado del molde..... | 118 |
| Figura 40. Longitud del molde. | 119 |
| Figura 41. Longitud de vigueta pre esforzada. | 119 |
| Figura 42. Minigato hidráulico de 10cm de carrera para pretensado..... | 120 |
| Figura 43. Maquina VITUS BRAIG para para pretensar acero (Braig, s.f.) | 121 |
| Figura 44. Maquina artesanal para pretensar acero..... | 123 |
| Figura 45. Mecanismo de sujeción entre la máquina y el cable de acero..... | 123 |
| Figura 46. Cuñas para pretensado y postensado | 124 |
| Figura 47. Sujeción móvil artesanal..... | 125 |
| Figura 48. Sujeción fija (Candado de acero)..... | 126 |
| Figura 49. Anclajes (Perfiles H). | 126 |

| | |
|--|------------|
| Figura 50. Distribución de las guías y los moldes en los anclajes..... | 127 |
| Figura 51. Sección de viguetas comerciales..... | 129 |
| Figura 52. Sección transversal de la viga de diseño. Detalles de la sección (Superior), Dimensiones de la sección a diseñar (Inferior)..... | 130 |
| Figura 53. Distribución en planta, del espacio de trabajo para la elaboración de las viguetas pre esforzadas. | 132 |
| Figura 54. Sección de la losa aligerada con viguetas pre esforzadas. | 138 |
| Figura 55. Cargas que soporta la viga pre esforzada. | 139 |
| Figura 56. Momento y fuerzas producidas por la carga última (W_u) | 139 |
| Figura 57. Esfuerzos producidos por el pre esfuerzo P_i | 140 |
| Figura 58. Esfuerzos producidos por el pre esfuerzo P_i y el peso propio M_o..... | 141 |
| Figura 59. Esfuerzos producidos por las cargas de servicio | 142 |
| Figura 60. Esfuerzos permisibles e iniciales..... | 143 |
| Figura 61. Esfuerzos permisibles y con cargas de servicio. | 143 |
| Figura 62. Preparación del lugar de trabajo..... | 150 |
| Figura 63. Colocación de moles de acero..... | 151 |
| Figura 64. Maquina artesanal para pre esforzar..... | 151 |
| Figura 65. Colocación del anclaje y seguros. | 152 |
| Figura 66. Mecanismo de sujeción fija. | 152 |
| Figura 67. Cuña artesanal (Sujeción móvil)..... | 153 |
| Figura 68. Colocación del acero. | 153 |
| Figura 69. Tensado del acero..... | 154 |
| Figura 70. Vaciado del concreto..... | 154 |
| Figura 71. Destensado y desencofrado..... | 155 |
| Figura 72. Corte y almacenamiento de viguetas pre esforzadas. | 155 |
| Figura 73. Rotura de briquetas a los 3 días..... | 156 |
| Figura 74. Rotura de briquetas a los 3 días..... | 157 |
| Figura 75. Rotura de briquetas a los 7 días..... | 157 |
| Figura 76. Rotura de briquetas a los 14 días..... | 158 |
| Figura 77. Rotura de briquetas a los 28 días..... | 158 |
| Figura 78. Rotura de briquetas a los 28 días..... | 159 |
| Figura 79. Diagrama de un aparato apropiado para el ensayo de flexión en el concreto por el método de carga al centro de la luz. | 160 |

| | |
|---|------------|
| Figura 80. Diagrama del ensayo a flexión en la vigueta pre esforzada por método de carga al centro de la luz. | 160 |
| Figura 81. Fabricación de caballetes metálicos..... | 163 |
| Figura 82. Colocación de las viguetas pre esforzadas. | 164 |
| Figura 83. Deflexión de las viguetas pre esforzadas. | 164 |
| Figura 84. Deflexión de diseño..... | 164 |
| Figura 85. Carga de bolsas superando la resistencia de diseño. | 165 |
| Figura 86. Ruptura de las viguetas pre esforzadas..... | 165 |
| Figura 87. Falla del acero en las viguetas pre esforzadas. | 165 |
| Figura 88. Vigueta Tipo I Fuente: Supermix | 171 |
| Figura 89. Vigueta tipo II | 171 |
| Figura 90. Vigueta tipo III..... | 172 |
| Figura 91. Vigueta tipo IV | 172 |
| Figura 92. Vigueta tipo V..... | 173 |
| Figura 93. Vigueta pre esforzada típica. | 175 |
| Figura 94. Formato de encuesta. | 177 |

CUADRO DE GRÁFICOS

| | |
|--|------------|
| Gráfico 1. Curvas comparativas de esfuerzo-deformación para acero de refuerzo y para acero de pre esfuerzo..... | 17 |
| Gráfico 2. Curvas de relajamiento del acero para alambres y cables relevados de esfuerzo | 19 |
| Gráfico 3. Curvas de esfuerzo-deformación típicas para concreto sujeto a compresión axial | 21 |
| Gráfico 4. Factor de corrección Ks | 26 |
| Gráfico 5. Diagrama de esfuerzo vs deformación del acero de alta resistencia..... | 35 |
| Gráfico 6. Deflexiones en una vigueta pre esforzada | 40 |
| Gráfico 7. Curva esfuerzo deformación de la P. Nro. 1 | 112 |
| Gráfico 8. Curva esfuerzo- deformación de la P. Nro. 2..... | 113 |
| Gráfico 9. Curva esfuerzo-deformación de la P. Nro. 3..... | 113 |
| Gráfico 10. Curva esfuerzo-deformación de la P. Nro. 4..... | 114 |
| Gráfico 11. Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas realizadas..... | 114 |
| Gráfico 12. Gráfico esfuerzo deformación del acero..... | 144 |

| | |
|---|------------|
| Gráfico 13. Curvas de cada ensayo, Carga (kg) – Deflexión (cm)..... | 161 |
| Gráfico 14. Curva granulométrica del agregado fno. | 186 |
| Gráfico 15. Curva granulométrica del agregado grueso de Huandar | 188 |
| Gráfico 16. Curva granulométrica combinada según Norma Técnica Peruana ... | 189 |
| Gráfico 17. Resumen de resultados del ensayo de compresión axial de 30 testigos cilíndricos de concreto a la edad de 28 días | 192 |
| Gráfico 18. Resumen de resultados del ensayo de compresión axial de 15 testigos cilíndricos de concreto a la edad de 3 días. | 194 |
| Gráfico 19. Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas realizadas..... | 195 |
| Gráfico 20. Deformación permanente de 0.2% | 195 |
| Gráfico 21. Curva esfuerzo deformación de la P. Nro. 1 | 196 |
| Gráfico 22. Curva esfuerzo- deformación de la P. Nro. 2..... | 196 |
| Gráfico 23. Curva esfuerzo-deformación de la P. Nro. 3..... | 197 |
| Gráfico 24. Curva esfuerzo-deformación de la P. Nro. 4..... | 197 |
| Gráfico 25. Tensión de Límite de fluencia y de Rotura | 198 |
| Gráfico 26. Deformación unitaria en el límite de fluencia y en el de Ruptura | 199 |
| Gráfico 27. Resistencia a la compresión axial a 3 días..... | 200 |
| Gráfico 28. Resistencia a la compresión axial a 7 días..... | 201 |
| Gráfico 29. Resistencia a la compresión axial a 28 días..... | 202 |
| Gráfico 30. Curvas de cada ensayo, Carga (kg) – Deflexión (cm)..... | 203 |
| Gráfico 31. Curva de Cargas máximas según ensayo a flexión..... | 205 |
| Gráfico 32. Curva de deflexiones máximas según ensayo a flexión..... | 205 |
| Gráfico 33. Proceso de carga (Curva Carga – Deflexión)..... | 206 |
| Gráfico 34. Proceso de descarga (Curva Carga – Deflexión) | 207 |
| Gráfico 35. Proceso de descarga (Línea de tendencia)..... | 208 |
| Gráfico 36. ¿Utilizo alguna vez viguetas pre esforzadas en la construcción? | 209 |
| Gráfico 37. ¿Conoce usted empresas fabricantes de viguetas pre esforzadas en la ciudad del Cusco? | 210 |
| Gráfico 38. ¿Tiene usted referencia de alguna obra en la que utilizaron viguetas pre esforzadas? | 210 |
| Gráfico 39. Si se fabricaran viguetas pre esforzadas en la zona de Cusco ¿Usted la utilizaría?..... | 211 |

CUADRO DE TABLAS

| | |
|--|------------|
| Tabla 1. Pre esfuerzo en el mundo. | 10 |
| Tabla 2. Propiedades de Alambres Sin Revestimiento Relevados de esfuerzo (ASTM A-421)..... | 14 |
| Tabla 3. Propiedades del Cable de Siete Alambres sin Revestimiento (ASTM A416). | 15 |
| Tabla 4. Propiedades de las Varillas de Acero de Aleación..... | 16 |
| Tabla 5. Factor por humedad relativa <i>Kh</i> | 26 |
| Tabla 6. Esfuerzos admisibles en el concreto en elementos pre esforzados sometidos a flexión..... | 30 |
| Tabla 7. Compuestos químicos que conforman el cemento | 56 |
| Tabla 8. Especificaciones Químicas Del Cemento Portland Tipo I | 57 |
| Tabla 9. Especificaciones físicas del Cemento Portland Yura Tipo I..... | 57 |
| Tabla 10. Características químicas de los cementos peruanos (Comparación entre el Portland Tipo I y el Puzolanico Tipo IP)..... | 57 |
| Tabla 11. Características físicas de los cementos peruanos..... | 58 |
| Tabla 12. Extracción y preparación de muestras | 72 |
| Tabla 13. Cantidad de material fino que pasa por el tamiz N°200 | 73 |
| Tabla 14. Pesos mínimos de la muestra según el tamaño de agregado..... | 75 |
| Tabla 15. Cantidad mínima de muestra según el tamaño máximo nominal..... | 79 |
| Tabla 16. Valores aceptados como máximo para el agua. | 87 |
| Tabla 17. Valores admisibles para el Agregados gruesos | 88 |
| Tabla 18. Granulometría del agregado grueso según la NTP. | 89 |
| Tabla 19. Granulometría del Agregado fino según la NTP. | 89 |
| Tabla 20. Valores admisibles para el Agregado fino..... | 90 |
| Tabla 21. Cantidades aproximadas de agua de amasado para diferentes SLUMP, tamaño máximo de agregado y contenido de aire. | 98 |
| Tabla 22. Relación agua/cemento vs f'c..... | 98 |
| Tabla 23. Volumen de agregado grueso compactado en seco por metro cubico de concreto..... | 99 |
| Tabla 24. Pesos específicos de los cementos | 99 |
| Tabla 25. Resumen de las propiedades de los materiales a utilizar | 102 |
| Tabla 26. Relación agua/cemento por resistencia..... | 103 |

| | |
|---|------------|
| Tabla 27. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revestimientos y tamaños nominales de agregado..... | 104 |
| Tabla 28. Peso del agregado grueso por unidad de volumen de concreto..... | 105 |
| Tabla 29. Resumen del diseño. | 106 |
| Tabla 30. Resumen general del diseño corregido. | 107 |
| Tabla 31. Resumen de diseño de mezcla según el metodo ACI | 108 |
| Tabla 32. Ensayo de testigos cilíndricos de concreto a la edad de 28 días. | 109 |
| Tabla 33. Ensayo de testigos cilíndricos de concreto a la edad de 3 días. | 110 |
| Tabla 34. Pruebas de acero..... | 115 |
| Tabla 35. Resumen de pérdidas debidas al pre esfuerzo. | 137 |
| Tabla 36. Cronograma de roturas de testigos cilíndricos. | 156 |
| Tabla 37. Rotura de briquetas a los 3 días. | 157 |
| Tabla 38. Rotura de briquetas a los 14 días. | 158 |
| Tabla 39. Rotura de briquetas a los 28 días. | 159 |
| Tabla 40. Prueba a flexión de viguetas pre esforzadas con la maquina universal. | 162 |
| Tabla 41. Carga de viguetas pre esforzadas..... | 166 |
| Tabla 42. Descarga en las viguetas pre esforzadas. | 166 |
| Tabla 43. Empresas que fabrican viguetas pre esforzadas y el mercado en el que operan. | 170 |
| Tabla 44. Viguetas pretensadas @0.60m (Hl=0.17m, con bovedilla de arcilla).... | 174 |
| Tabla 45. PBI por sectores económicos 2017. | 175 |
| Tabla 46. Resultado de encuestas..... | 178 |
| Tabla 47. Resultado de encuestas en porcentaje..... | 178 |
| Tabla 48. Materiales para la elaboracion de las viguetas pre esforzadas. | 179 |
| Tabla 49. Analisis de costo unitario de elaboracion de viguetas pre esforzadas por metro lineal (Rendimiento 27 ml/dia) | 180 |
| Tabla 50. Analisis de costo unitario de elaboracion de viguetas pre esforzadas por metro lineal (Rendimiento 54ml/dia) | 181 |
| Tabla 51. Propiedades mecanicas de agregados gruesos cantera HUANDAR | 183 |
| Tabla 52. Propiedades mecanicas de agregados finos cantera VILCABAMBA ... | 183 |
| Tabla 53. Tabla comparativa de agregado fino | 184 |
| Tabla 54. Granulometría del agregado fino cantera VILCABAMBA | 186 |
| Tabla 55. Tabla resumen agregado grueso | 187 |

| | |
|---|------------|
| Tabla 56. Granulometría del agregado grueso cantera HUANDAR..... | 188 |
| Tabla 57. Tabla de la granulometría combinada corregida | 189 |
| Tabla 58. Ensayo de testigos cilíndricos de concreto a la edad de 28 días. | 191 |
| Tabla 59. Ensayo de testigos cilíndricos de concreto a la edad de 3 días. | 193 |
| Tabla 60. Pruebas de acero..... | 198 |
| Tabla 61. Cronograma de roturas de testigos cilíndricos. | 200 |
| Tabla 62. Rotura de briquetas a los 3 días. | 200 |
| Tabla 63. Rotura de briquetas a los 14 días. | 201 |
| Tabla 64. Rotura de briquetas a los 28 días. | 202 |
| Tabla 65. Prueba a flexión de viguetas pre esforzadas con la maquina universal. | 204 |
| Tabla 66. Carga de viguetas pre esforzadas..... | 206 |
| Tabla 67. Descarga en las viguetas pre esforzadas. | 207 |
| Tabla 68. Resultado de encuestas..... | 208 |
| Tabla 69. Resultado de encuestas en porcentaje..... | 209 |

RESUMEN DEL TRABAJO DE INVESTIGACION

En los últimos años, nuestro país está pasando por un proceso de modernización en los procesos constructivos, el cual favorece a la posibilidad de aplicar nuevas tecnologías en la construcción, tal es el caso de las viguetas pre esforzadas.

En este proyecto de investigación, se realizó el estudio de factibilidad para la elaboración de viguetas pre esforzadas con agregados de la zona de Cusco, a continuación, se analizan de los componentes para la elaboración de viguetas pre esforzadas, tales como las propiedades de los agregados de la zona del Cusco y del acero de alta resistencia. Estas propiedades, nos ayudaron al diseño del concreto de alta resistencia y al diseño de las viguetas pre esforzadas. Al mismo tiempo se analizó el mercado para este producto en la zona de Cusco, el cual resultó óptimo para su comercialización, todo esto con un costo de elaboración bajo.

Así mismo se detallan las herramientas y maquinas necesarias para elaborar viguetas pre esforzadas, se adjunta también una metodología para diseñar y fabricar viguetas pre esforzadas artesanalmente que podrían ser comercializadas si en el futuro alguien desea hacer una inversión en este campo de la construcción.

Finalmente, esta investigación cumplió con el objetivo de determinar la factibilidad de la elaboración de viguetas pre esforzadas con agregados de la zona de Cusco. Elaborando viguetas de 12 centímetros de peralte y 12 centímetros de ancho con 4 alambres de alta resistencia de 4.2 milímetros de diámetro ($F_y = 9,501.60 \text{ Kg/cm}^2$) y con una resistencia de del concreto a los 3 días de 360.29 Kg/cm^2 y a los 28 días de 501.79 Kg/cm^2 , la viga está diseñada para una longitud de 4.00 metros, para una carga máxima de 1320.25 kilogramos y una deflexión máxima promedio de 1.71 centímetros.

ABSTRAC

In the last years, our country is undergoing a period of modernization in the construction processes, which favors a possibility of applying new technologies in construction, such is the case of prestressed joists.

In this research project, the feasibility study was carried out for the manufacturing of prestressed joists with aggregates from Cusco city, then the components for the manufacturing of prestressed joists were analyzed, such as the property of the aggregates from Cusco and high strength steel. These properties, helped us in the design of high strength concrete and the design of prestressed joists. At the same time, the market for this product in Cusco city was analyzed, which was optimum with a low production cost.

In addition, we are detailed the tools and machines necessary to manufacture prestressed joists, also attached a methodology to design and manufacture prestressed joists crafts that can be commercialized if in the future someone wishes to make an investment in this field of construction.

Finally, this research fulfilled the objective of determining the feasibility of the elaboration of prestressed joists with aggregates from Cusco city. Making prestressed joists 12 centimeters high and 12 centimeters width with 4 wires of high resistance of 4.2 millimeters of diameter ($F_y = 9.501.60 \text{ Kg/cm}^2$) and concrete with resistance 360.29 Kg/cm^2 at 3 days and 501.79 kg / cm^2 at 28 days, the joist is designed for 4.00 meters length, for a maximum load of 1320.25 kilograms and an average maximum deflection of 1.71 centimeters.

INTRODUCCIÓN

Esta tesis de investigación tiene como principal propósito plantear el proyecto de elaborar viguetas pre esforzadas con agregados de la zona de Cusco. El objetivo principal es establecer la factibilidad de su fabricación mediante el uso de tecnología y materiales con los que se cuenta en nuestra ciudad, haciéndolos económicamente rentables y que puedan competir en el mercado con los productos importados ya existentes.

De este modo, todo el planteamiento y desarrollo de esta tesis de investigación se fundamenta en una interrogante fundamental que da sentido y forma a todos nuestros objetivos. Esta interrogante es: ¿Es factible elaborar viguetas pre esforzadas con los agregados de la zona de Cusco?

De esta pregunta se elaboran nuevas inquietudes, las cuales nos llevan a investigar las propiedades de los materiales a utilizar, el tipo de elaboración que se utiliza y el análisis del mercado actual del uso de viguetas pre esforzadas en la construcción. Esto da lugar a la hipótesis que plantea la factibilidad para su elaboración cumpliendo debidamente los requerimientos del mercado.

Para ello se desarrollan temas que se encuentran implícitos en la elaboración de viguetas pre esforzadas tales como el concreto pre esforzado, en especial a las viguetas pre esforzadas, el diseño de estas y los tipos de elaboración que existen, tomando en cuenta la posibilidad de utilizarlos en nuestro medio.

Las viguetas pre esforzadas son una alternativa para la construcción de losas aligeradas, que se vienen realizando de manera tradicional, además, la instalación de una losa con viguetas pre esforzadas tiene múltiples ventajas, como es a nivel constructivo reduce el tiempo de construcción, y a nivel económico hay estudios que hablan de su alta rentabilidad. Durante el desarrollo de este estudio de factibilidad, se tocan temas como el estudio de los agregados utilizados para diseños de mezclas en Cusco, las herramientas y máquinas necesarias para fabricar viguetas pre esforzadas, se realiza el diseño y un manual de fabricación para estos productos con la tecnología de nuestro medio, para concluir se tiene un estudio de mercado para demostrar la demanda existente para las viguetas pre esforzadas en la ciudad de Cusco.

En base a lo indicado, esta investigación se llevó a cabo con el fin de dar pautas importantes para implementar una planta de fabricación de viguetas pre esforzadas en la ciudad de Cusco utilizando nuestros recursos y la mano de obra local.



CAPITULO I

1. PLANTEAMIENTO DEL PROBLEMA

1.1. Identificación del problema

En los últimos años la tecnología en la construcción ha ido evolucionando y esto trae la necesidad de aplicar avances tecnológicos en nuestra ciudad para estar a la vanguardia en el uso de nuevas técnicas de diseño y de construcción, tal es el caso de las viguetas pre esforzadas.

En nuestra ciudad del Cusco se aprecia que el uso de las viguetas pre esforzadas no es frecuente, al mismo tiempo, no se conoce cuan factible pueda ser su elaboración utilizando nuestros materiales, tecnología y los conocimientos sobre el tema. Esto se debe a que no existe una planta industrial o artesanal que se encargue de producirlas.

También se conoce que las viguetas pre esforzadas son una opción para mejorar la calidad y tiempo de una determinada obra civil. Uno de los requisitos más importantes en la elaboración de las viguetas pre esforzadas es cumplir con las demandas solicitadas, y determinar las propiedades mecánicas que tendrían usando agregados de la zona de Cusco, y así como, el costo que demandaría su elaboración.

La Facultad de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco se ha distinguido por su papel de ente desarrollador de tecnología y formador de profesionales que el país requiere, es por esta razón por la cual se encuentra inmersa en este rol y ha comprendido que esta tarea implica un permanente contacto con el entorno nacional, es por eso que este trabajo servirá como referencia para fabricar y utilizar viguetas pre esforzadas en las construcciones de Cusco.

1.2. Formulación del problema objeto de investigación

A pesar de los grandes avances de la tecnología en la construcción, es posible apreciar que, en nuestra ciudad, el poco uso que se le da a las viguetas pre esforzadas.

De este análisis, las preguntas que salen a flote son las siguientes:

1. ¿Es factible elaborar viguetas pre esforzadas con agregados de la zona de Cusco?
2. ¿Cuáles son las características de los agregados de la zona de Cusco, y si es posible utilizarlos para la fabricación de viguetas pre esforzadas?
3. ¿Cuáles son las propiedades mecánicas de las viguetas fabricadas con agregados de la zona de Cusco, y si estas cumplen con las solicitudes que se demanda?
4. ¿Es posible aperturar un mercado para el uso de las viguetas pre esforzadas en la



construcción de losas aligeradas en la ciudad de Cusco?

5. ¿Cuál será el costo de fabricación de las viguetas pre esforzadas fabricadas con agregados de la zona de Cusco?

6. ¿Será factible la elaboración de viguetas pre esforzadas, utilizando agregados de la zona del Cusco?

Todos estos aspectos ayudan a plantear la necesidad de fabricar viguetas pre esforzadas con materiales de nuestra zona para satisfacer la posible demanda existente en la ciudad del Cusco.

1.3. Delimitación y viabilidad de la investigación

Delimitación:

En este trabajo de investigación solo se tocarán los temas referentes al diseño de viguetas pre esforzadas de 4 metros de longitud entre apoyos, cálculo de las propiedades mecánicas de estas viguetas y una metodología para su correcta elaboración (concreto de alta resistencia, máquina de pretensado, etc.). Finalmente se realizará un estudio de viguetas pre esforzadas en la ciudad de Cusco. Todo esto para determinar la factibilidad de este proyecto.

Viabilidad:

- Las metodologías para la fabricación de viguetas pre esforzadas son diversas, para este caso elegiremos la más adecuada.
- El laboratorio de la facultad de Ingeniería Civil cuenta con la máquina universal la cual servirá para determinar las propiedades de los materiales utilizados en la fabricación de las viguetas y luego también para determinar las propiedades mecánicas de las viguetas pre esforzadas fabricadas por los tesistas.
- También se dispone de recursos humanos y materiales necesarios para la fabricación y toma de datos necesarios para cumplir con los objetivos de esta tesis.
- Espacio disponible para la elaboración de las viguetas pre esforzadas.

1.4. Objetivos de la investigación

1.4.1. Objetivo General

- Determinar si la elaboración de viguetas pre esforzadas con agregados de la zona de Cusco es factible.

1.4.2. Objetivos Específicos

- Identificar el uso que se dan a las viguetas pre esforzadas en las construcciones de la ciudad del Cusco.



- Estudio previo de los materiales a utilizar.
- Diseñar las viguetas pre esforzadas, y concreto de alta resistencia con agregados de la zona de Cusco.
- Elaborar una metodología para la elaboración de viguetas pre esforzadas con materiales y tecnología de la zona del Cusco.
- Determinar las propiedades mecánicas en flexión de viguetas pre esforzadas, elaboradas con agregados de la zona de Cusco.
- Definir el costo de fabricación de estas viguetas pre esforzadas, elaboradas con materiales de la zona de Cusco.

1.5. Formulación de la hipótesis.

Es factible elaborar viguetas pre esforzadas con agregados de la zona de Cusco que cumplan con los requerimientos establecidos por el mercado.

1.6. Justificación e Importancia del problema

Se vio por conveniente diseñar y fabricar viguetas pre esforzadas con agregados de la zona de Cusco para mostrar que con los materiales de nuestra zona se puede alcanzar fácilmente las demandas que requiere este elemento estructural; también será muy útil introducir y abrir un nuevo mercado ya que en otros lugares son muy utilizados.

La importancia del uso y fabricación de estas viguetas mejorara la tecnología en los procesos constructivos de edificaciones en nuestra ciudad, siendo un punto de referencia en el futuro, para personas que estén interesadas en competir con las empresas fabricantes de estos elementos.

1.7. Identificación de variables de estudio.

Variable Dependiente

- Factibilidad de la elaboración de viguetas pre esforzadas con agregados de la zona de Cusco.

Variables Independientes

- Los agregados a usar, durante la preparación de la viga
- El acero de refuerzo que se empleara para la preparación de la viga
- Costo de fabricación de las viguetas pre esforzadas.
- Propiedades mecánicas de las viguetas pre esforzadas



CAPÍTULO II

2. MARCO TEORICO CONCEPTUAL

2.1. Viguetas Pre esforzadas

2.1.1. Introducción

El pre esforzado puede definirse en términos generales como el precargado de una estructura, antes de la aplicación de las cargas de diseño requeridas, hecho en forma tal que mejore su comportamiento general. Aunque los principios y las técnicas del pre esforzado se han aplicado a estructuras de muchos tipos y materiales, la aplicación más común ha tenido lugar en el diseño del concreto estructural.

En esencia, el concreto es un material que trabaja a compresión. Su resistencia a la tensión es mucho más baja que a la compresión, y en muchos casos, al diseñar, se deja fuera de consideración aquélla. Por tanto, el pre esforzado del concreto implica naturalmente la aplicación de una carga compresiva, previa a la aplicación de las cargas anticipadas de diseño, en forma tal que se reduzcan o eliminen los esfuerzos de tensión que de otra forma ocurrirían.

En efecto, el concepto original del concreto pre esforzado consistió en introducir en vigas suficiente pre compresión axial para que se eliminaran en el miembro cargado todos los posibles esfuerzos de tensión que obrarán en el concreto. Sin embargo, a medida que se ha desarrollado el conocimiento de esta forma de construcción, se ha visto claramente que esta concepción es innecesariamente restrictiva, y en la práctica actual de diseño se permite que haya esfuerzos de tensión en el concreto, y hasta cierto agrietamiento limitado. Haciendo variar la magnitud del pre esfuerzo compresivo puede limitarse al grado deseado el número y el ancho de las grietas, igualmente puede controlarse la deflexión del miembro. Se pueden diseñar vigas con deflexión nula para una combinación específica de pre esfuerzo y cargas externas. Desde el punto de vista de las condiciones de servicio, tal pre esforzado parcial presenta una mejoría sustancial, no sólo en la construcción convencional de concreto armado, sino también en la forma original del pre esforzado completo. El cual, si bien eliminaba el agrietamiento bajo las cargas de servicio producía a menudo una combadura hacia arriba que causaba problemas.

Pero no es sólo por las condiciones de servicio mejoradas que el pre esforzado ha alcanzado importancia. Por el control del agrietamiento y la deflexión bajo las cargas de



servicio, el pre esforzado hace posible emplear el económico y eficaz refuerzo de acero de alta resistencia a la tensión y concreto de alta resistencia.

Los anchos de las grietas en las vigas convencionales de concreto armado, son proporcionales al esfuerzo que se genera en el refuerzo de tensión, y por esta razón tienen que limitarse los esfuerzos en el acero a valores mucho menores que los que podrían usarse si eso no ocurriera. En las vigas pre esforzadas, el alto esfuerzo en el acero no va acompañado por grietas anchas en el concreto, porque se aplica al acero gran parte del esfuerzo antes de ser anclado al concreto, y antes de que se aplique la carga al miembro. La deflexión de las vigas ordinarias de concreto armado está ligada también directamente a los esfuerzos. Si se permitieran esfuerzos muy grandes las deformaciones acompañantes también grandes, que ocurrirían en el concreto y en el acero, producirían inevitablemente grandes rotaciones de las secciones transversales a lo largo del miembro las cuales se traducirían directamente a grandes deflexiones. Pre deformando el refuerzo de alta resistencia a la tensión de las vigas pre esforzadas, se evita las grandes rotaciones y deflexiones que ocurrirían en otras condiciones. Además, el miembro de concreto esencialmente libre de grietas es más rígido para ciertas dimensiones dadas de la sección, que lo que sería si se permitiera que hubiera agrietamiento basta el grado típico de la construcción de concreto armado.

En consecuencia, no es sólo por la mejoría del comportamiento bajo la carga de servicio, por el control del agrietamiento y la deflexión por lo que el concreto pre esforzado es conveniente, sino también porque permite la utilización de materiales eficientes de alta resistencia. Pueden usarse miembros de menores dimensiones y más ligeros. Se reduce la relación de la carga muerta a la carga viva, se aumentan los claros y se amplía considerablemente la gama de aplicaciones posibles del concreto estructural.

2.1.2. Antecedentes

Aunque la primera proposición para aplicar el pre esforzado al concreto se hizo desde 1886 en los Estados Unidos, no fue sino hasta los años treinta que, como resultado de los estudios del renombrado Ingeniero francés Eugene Freyssinet, el concreto pre esforzado llegó a ser una realidad práctica. En Europa, en el periodo de aguda escasez de materiales que siguió a la Segunda Guerra Mundial, Freyssinet y otros pioneros como Finsterwalder y Magnel, demostraron las notables posibilidades de este nuevo concepto de Diseño y establecieron la Etapa del desarrollo que habría de tener lugar en los años siguientes.



Principalmente por razones económicas el desarrollo del concreto pre esforzado ha tenido lugar en los Estados Unidos siguiendo líneas muy diferentes en comparación con el desarrollo que tuvo Europa. Hasta tiempos recientes, el interés principal había estado en las unidades pre coladas pretensadas de claro corto o mediano, que podían llevarse a cabo en producción en masa con grandes economías en los costos de mano de obra. Habiéndose usado para pisos, techos y muros, estas unidades han dado cuenta de una fracción significativa de las nuevas construcciones, e indudablemente continuara dándola.

Aunque prácticamente fue hasta 1926 en que el señor E. Freyssinet realizó sus célebres experiencias de Plougastel, el "Pre esforzado" no existía, es justo mencionar como un pequeño homenaje de gratitud por los esfuerzos realizados, a algunos de los investigadores que desde el año de 1886 perseguían, aunque en forma confusa, la aplicación de esfuerzos previos a los elementos estructurales.

Demuestra y cuantifica la existencia del flujo plástico del concreto, deduce y demuestra la necesidad de emplear concretos de gran resistencia y de módulo de elasticidad elevado y, al mismo tiempo, la necesidad de aceros de alta resistencia y módulo de elasticidad bajo. Pero no sólo hace posible, con tal descubrimiento, la existencia del concreto pre esforzado, sino que también inventa dispositivos para pre esforzar y procedimientos constructivos aplicables a esta nueva técnica.

En síntesis, no sólo descubre la forma de hacer posible el pre esforzado, sino que lo hace prácticos industrializable y económico; es pues a él, con indiscutible derecho a quien se le puede y debe otorgar la paternidad de este avance tecnológico tan notable en la Ingeniería Civil.

A partir de esta época el pre esforzado se desarrolla en todas partes del mundo (Tabla 1).



Tabla 1. Pre esfuerzo en el mundo.

| Año | Precursor | Trabajo |
|-------------|--|--|
| 1928 | Eugene Freyssinet | Patenta el primer sistema de pre esforzado del concreto. |
| 1930 | En Alemania, Hoyer | Organiza el trabajo de construcción en serie de elementos de concreto pre esforzado. |
| 1933 | Moersch, Dischinger y Finstervalder | Inventan sistemas especiales de anclaje y estudian la aplicación a un puente. |
| 1936 | Losier | Realiza pruebas con cementos expansivos y en compañía de Lebelle escriben un tratado sobre el tema |
| 1936 | Shorer y Charles | Experimentan con cables enrollados sobre un tubo. |
| 1937 | La casa Wayss y Fraytag | Realizaron pruebas con grandes vigas |
| 1937 | En Inglaterra, Mautner, Evans | Escribiendo este último un tratado sobre pre esforzado. |
| 1938 | En Suiza, Ross, Ritter, Lardy, Stucky, Bolomey, Hubner y algunos otros. | |
| 1938 | En Italia a partir de 1938, Colonnetti, Cestelil, Magistretti | Trabajaron intensamente para desarrollar esta técnica en su país. |
| 1945 | En Bélgica, principalmente, Magnel | Desarrollaron su técnica especial de anclaje a base de placas Sandwich. |
| 1949 a 1953 | En Alemania, construcción de puentes | Se construyeron 350 de pre esforzado. |
| 1953 | En EE. UU. sólo la Preload Company construyó hasta el año de 1953, 700 tanques elevados. | En el mismo año se fundaron sólo en este país 34 plantas de Concreto Pre Esforzado. |

Fuente: (Nilson, Diseño de estructuras de Concreto Presforzado, 1982)

Actualmente, en todas partes del mundo, gran número de investigadores trabaja intensamente para mejorar cada vez más el pre esforzado.

En todas partes del mundo se construyen puentes, edificios, presas, hangares, pistas, carreteras, durmientes, postes, tuberías, cascarones, etc., es decir, todo tipo de estructuras y elementos estructurales.



Finalmente, en nuestro país, a pesar de la falta de aceros de alta resistencia, toma carta de naturalización el Concreto Pre esforzado; creemos firmemente que en los próximos 10 años se empleará aquí con la misma intensidad con la que se emplea en los otros países más adelantados en esta técnica.

2.1.3. Materiales

El uso de acero de alta resistencia para el pre esfuerzo es necesario por razones físicas básicas. Las propiedades mecánicas de este acero tal como lo revelan las curvas de esfuerzo-deformación, son algo diferentes de aquellas del acero convencional usado para el refuerzo del concreto. Adicionalmente a su alta resistencia, el proyectista debe tomar en cuenta las diferencias de ductilidad, carencia de un punto de fluencia bien definido, y otras características de gran importancia técnica.

Las varillas de refuerzo comunes usadas en estructuras no pre esforzadas, también desempeñan un papel importante dentro de la construcción pre esforzado. Se usan como refuerzo en el alma, refuerzo longitudinal suplementario, y para otros fines.

El concreto empleado en miembros pre esforzados es normalmente de resistencia más alta que el de las estructuras no pre esforzadas. Las diferencias en el módulo de elasticidad, capacidad de deformación y resistencia deberán tomarse en cuenta en el diseño, y la característica de dependencia del tiempo asume una crucial importancia.

El aumento de empleo de concretos ligeros en los años recientes ha permitido la reducción de las cargas muertas, lo cual es un hecho de especial importancia para las estructuras de concreto, y ha facilitado el manejo de grandes componentes estructurales pre colados. Los avances en la tecnología del concreto han resultado en el desarrollo de concretos de agregados ligeros con resistencia comparables a las de materiales con densidad normal. Sus características de deformación, inclusive los efectos que dependen del tiempo, deberán de comprenderse plenamente antes de ser usados con plena confianza.

2.1.3.1. Acero de alta resistencia

La razón para el fracaso de la mayoría de los primeros intentos en concreto pre esforzado fue la falla de emplear aceros con inadecuado nivel de esfuerzo-deformación. Los cambios de longitud, función del tiempo, ocasionados por la contracción y el flujo plástico del concreto, fueron de tal magnitud que eliminaron el pre esfuerzo en el acero. La importancia de una deformación inicial elevada como consecuencia esfuerzos iniciales elevados en el acero se puede mostrar con un simple ejemplo.



En la Figura 1 se muestra un miembro corto de concreto al cual se pre esforzará axialmente usando un tendón de acero. En el estado sin pre esfuerzo el concreto tiene una longitud “ l_c ” y el acero sin pre esfuerzo tiene una longitud “ l_s ”. Después de tensar el acero y de que se transfiera la fuerza al concreto a través de los anclajes extremos, la longitud del concreto se acorta hasta “ l'_c ” y la longitud del acero estirado es” l'_s ”. Estos valores, por supuesto deben ser idénticos, tal como se indica en la Figura 1.

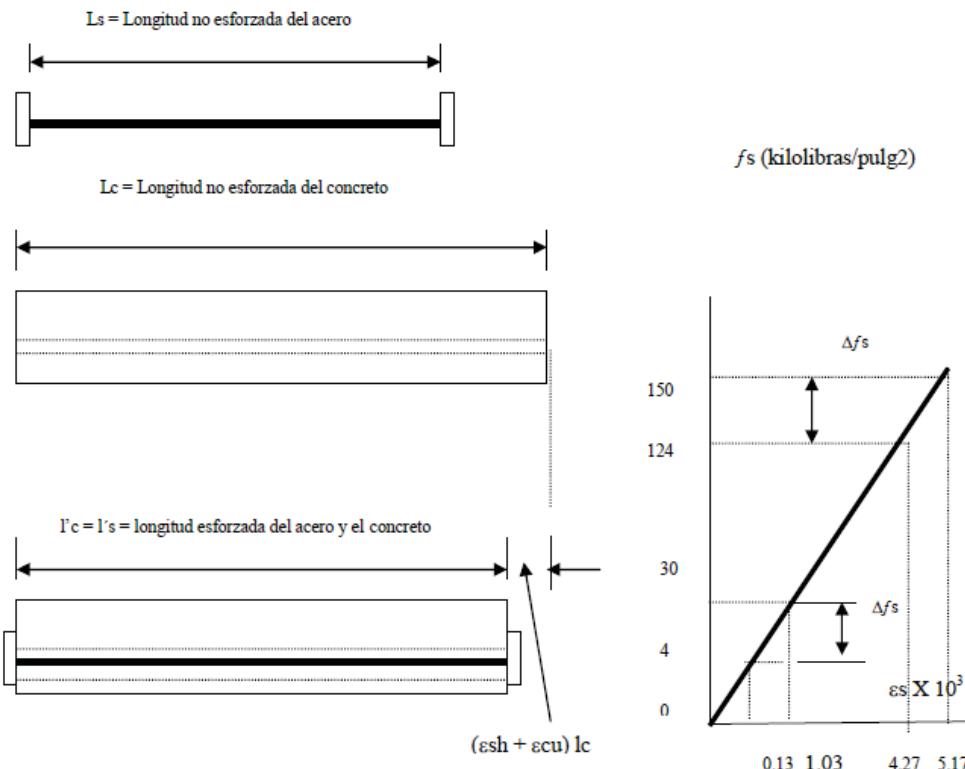


Figura 1. Efecto de la contracción y el flujo plástico del concreto en la reducción de la fuerza pretensora. (a) Miembro del concreto axialmente pre esforzado (b) Esfuerzo del acero.

Fuente: (Nilson, Diseño de estructuras de Concreto Presforzado, 1982)

2.1.3.1.1. Tipos de acero pre esforzado.

Existen tres formas comunes en las cuales se emplea el acero como tendones en concreto pre esforzado: alambres redondos estirados en frío, cable trenzado y varillas de un acero de aleación. Los alambres y los cables trenzados tienen una resistencia a la tensión de más o menos $17,600 \text{ kg/cm}^2$ (1720 N/mm^2), tanto que la resistencia de las varillas de aleación está entre los $10,000 \text{ kg/cm}^2$ y $16,000 \text{ kg/cm}^2$; $11,250 \text{ kg/cm}^2$ (1000 N/mm^2) y 1100 N/mm^2 dependiendo del grado.



2.1.3.1.1.1. Alambres redondos

Los alambres redondos que se usan en la construcción de concreto pre esforzado y ocasionalmente en obras pretensadas se fabrican en forma tal de que cumplan con los requisitos de la especificación ASTM A42 1, “Alambres sin Revestimiento, Relevados de Esfuerzo, para Concreto Pre esforzado”. Los alambres individuales se fabrican laminando en lingotes calientes de acero hasta obtener varillas redondas. Después del enfriamiento, las varillas se pasan a través de troqueles para reducir su diámetro hasta el tamaño requerido. En el proceso de esta operación de estirado, se ejecuta trabajo en frío sobre el acero, lo cual modifica grandemente sus propiedades mecánicas e incrementa su resistencia. A los alambres se les libera de esfuerzo después de estirado en frío mediante un tratamiento continuo de calentamiento hasta obtener las propiedades mecánicas prescritas.

Los alambres se consiguen en cuatro diámetros tal como se muestra en la Tabla 2 y en dos tipos. El alambre tipo BA se usa en aplicaciones para las que las deformaciones de los extremos del alambre en frío se usan como medio de anclaje (anclaje de botón), y el tipo WA se usa para aplicaciones en las cuales los extremos se anclan por medio de cuñas y no se encuentra involucrada ninguna deformación de extremo del alambre en frío (anclaje de cuña).

También se puede conseguir alambres de bajo relajamiento, a veces conocidos como estabilizados, mediante pedido especial. Se emplean cuando se quiere reducir al máximo la pérdida de pre esfuerzo.

Los tendones están compuestos normalmente por grupos de alambres, dependiendo el número de alambres de cada grupo del sistema particular usado y de la magnitud de la fuerza pretensora requerida. Los tendones para prefabricados post tensados típicos pueden consistir de 8 a 52 alambres individuales. Se pueden emplear tendones múltiples, cada uno de ellos compuesto de grupos de alambres para cumplir con los requisitos.



Tabla 2. Propiedades de Alambres Sin Revestimiento Relevados de esfuerzo (ASTM A-421)

| Diámetro nominal | Mínima resistencia de Tensión Mínimo Kg/cm2 (N/mm2) | | Esfuerzo para Una Elongación de 1 % Kg/cm2 (N/mm2) | | |
|------------------|---|----------|--|---------------|---------------|
| | Pulg/mm | Tipo BAH | Tipo WA | Tipo BA | Tipo WA |
| 0.192(4.88) | “ | | 17,580(1725) | “ | 14,060(1380) |
| 0.196(4.98) | 16,875(1655) | | 17,580 (1725) | 13,500 (1325) | 14,060 (1380) |
| 0.250(6.35) | 16,875 (1655) | | 16,875 (1655) | 13,500 (1325) | 13,500 (1325) |
| 0.276(7.01) | “ | | 16,520(1622) | “ | 13,220(1295) |

Fuente: (Nilson, Diseño de estructuras de Concreto Presforzado, 1982)

2.1.3.1.1.2. Cable trenzado

El cable trenzado se usa casi siempre en miembros pretensados y a menudo se usa también en construcción post tensada. El cable trenzado se fabrica de acuerdo con la especificación ASTM A 416, "Cable Trenzado, Sin Revestimiento, de Siete Alambres, Relevado de Esfuerzos, Para Concreto Pre esforzado" - Es fabricado con siete alambres firmemente torcidos alrededor de un séptimo de diámetro ligeramente mayor. El paso de la espiral del torcido es de 12 a 16 veces el diámetro nominal del cable.

Para los cables trenzados se usa el mismo tipo de alambres relevados de esfuerzo y estirados en frío que los que se usan para los alambres individuales de pre esfuerzo. Sin embargo, las propiedades mecánicas se evidencian ligeramente diferentes debido a la tendencia de los alambres torcidos a enderezarse cuando se le sujeta a tensión, debido a que el eje de los alambres no coincide con la dirección de la tensión. Al cable se le releva de esfuerzos mediante tratamiento térmico después del trenzado. Los cables de bajo relajamiento o estabilizados se pueden conseguir mediante pedido especial.

Los cables pueden obtenerse entre un rango de tamaños que va desde 0.250 pulg. hasta 0.600 pulg. de diámetro, tal como se muestra en la Tabla 3. Se fabrican dos grados: el grado 250 y el grado 270 los cuales tienen una resistencia última mínima de 250,000 y 270,000 Lb/pulg.² (1720 y 1860 N/mm²) respectivamente, estando estas basadas en el área nominal del cable.



Tabla 3. Propiedades del Cable de Siete Alambres sin Revestimiento (ASTM A416).

| Diámetro Nominal Pulg. (mm) | Resistencia a la Ruptura Lb (kN) | Área Nominal del cable Pulg ² (mm ²) | Carga Mínima Para una Elongación de 1% Lb/(kN) |
|--------------------------------|-------------------------------------|--|--|
|--------------------------------|-------------------------------------|--|--|

Grado 250

| | | | |
|--------------|---------------|---------------|----------------|
| 0.250 (6.35) | 9000 (40.0) | 0.036 (23.22) | 7650 (34.0) |
| 0.313 (7.94) | 14,500 (64.5) | 0.058 (37.42) | 12,300 (54.7) |
| 0.375(9.53) | 20.000(89.0) | 0.080(51.61) | 17,0(X) (75.6) |
| 0.438(11.11) | 27.000(120.1) | 0.108(69.68) | 23,000(102.3) |
| 0.500(12.7) | 36,000(160.1) | .144(92.9) | 30,600(136.2) |
| 0.600(15.24) | 54,000(240.2) | 0.216(139.35) | 45,900(204.2) |

Grado 270

| | | | |
|---------------|-----------------|----------------|---------------|
| 0.375 (9.53) | 23,000 (102.3) | 0.085(54.84) | 19,550 (87.0) |
| 0.438(11.11) | 31.000(137.9) | 0.115(74.19) | 26,350(117.2) |
| 0.500(12.70) | 41.300(183.7) | 0.153(98.71) | 35,100(156.1) |
| 0.600 (15.24) | 58,600 (26().7) | 0.217 (140.00) | 49,800(221.5) |

Fuente: (Nilson, Diseño de estructuras de Concreto Presforzado, 1982)

2.1.3.1.1.3. Varillas de acero de aleación

En el caso de varillas de aleación de acero, la alta resistencia que se necesita se obtiene mediante la introducción de ciertos elementos de ligazón, principalmente manganeso, silicón y cromo durante la fabricación de acero. Adicionalmente, se efectúa trabajo en frío en las varillas al fabricar estas para incrementar aún más su resistencia. Después de estirarlas en frío, a las varillas se les releva de esfuerzos para obtener las propiedades requeridas. Las varillas se fabrican de manera que cumplan con los requisitos de la Especificación ASTM A722, “Varillas de Acero de Alta Resistencia, sin Revestimientos, Para Concreto Pre esforzado”.



Tabla 4. Propiedades de las Varillas de Acero de Aleación

| Diámetro Nominal Pulg (mm) | Área Nominal De la Varilla Pulg ² (mm ²) | Resistencia a la ruptura Lb(kN) | Mínima carga para una elongación de 0.7% Lb(kN) |
|----------------------------|---|---------------------------------|---|
|----------------------------|---|---------------------------------|---|

Grado 145

| | | | |
|---------------|-------------|---------------|--------------|
| 1/2(12.70) | 0.196(127) | 28,000(125) | 25,000(111) |
| 5/8 (15.88) | 0.307 (198) | 45,000 (200) | 40,000(178) |
| 3/4(19.05) | 0.442(285) | 64,000(285) | 58,000(258) |
| 7/8(22.23) | 0.601 (388) | 87,000(387) | 78,000(347) |
| 1 (25.40) | 0.785(507) | 114,000(507) | 102,000(454) |
| 1 1/8 (28.58) | 0.994(642) | 144,0% (641) | 129,000(574) |
| 1 1/4 (31.75) | 1.227(792) | 178,000(792) | 160,000(712) |
| 1 3/8 (34.93) | 1.485 (958) | 215,000 (957) | 193,000(859) |

Grado 160

| | | | |
|---------------|------------|---------------|---------------|
| 1/2(12.70) | 0.196(127) | 31,000(138) | 27,000(120) |
| 5/8(15.88) | 0.307(198) | 49,000(218) | 43,000(191) |
| 3/4 (19.05) | 0.442(285) | 71,000 (316) | 62,000 (276) |
| 7/8 (22.23) | 0.601(388) | 96,000(427) | 84,000(374) |
| 1 (25.40) | 0.785(507) | 126,000(561) | 110000(490) |
| 1 1/8 (28.58) | 0.994(642) | 159,000 (708) | 139,000 (619) |
| 1 ¼ (31.75) | 1.227(792) | 196,000(872) | 172,000(76S) |
| 1 3/8 (34.93) | 1.485(958) | 238,000(1059) | 208,000(926) |

Fuente: (Nilson, Diseño de estructuras de Concreto Presforzado, 1982)

Las varillas de acero de aleación se consiguen en diámetros que varían de 1/2 pulg. hasta 1 3/8 pulg, tal como se muestra en la Tabla 4, y en dos grados, el grado 145 y el 160, teniendo resistencias últimas mínimas de 145,000 y 160,000 lb/pulg² (1000 y 1100 N/mm²), respectivamente.

2.1.3.1.2. Propiedades de esfuerzo-deformación del acero

La mayoría de las propiedades mecánicas de los aceros que son de interés para los Ingenieros de diseño, se pueden obtener directamente de sus curvas de esfuerzo-



deformación. Tales características importantes como el límite elástico proporcional, el punto de fluencia, la resistencia, la ductilidad y las propiedades de endurecimiento por deformación son evidentes de inmediato. Resulta instructivo comparar, en términos generales, las curvas de esfuerzo-deformación a tensión de varillas de refuerzo ordinarias con las de aceros típicos para el pre esfuerzo, tal como se hace en el Gráfico 1. Las diferencias más notables son el mucho más elevado límite elástico proporcional y la resistencia disponible en alambres redondos y en varillas de aleación usadas como pre esfuerzos, y la substancialmente más baja ductilidad.

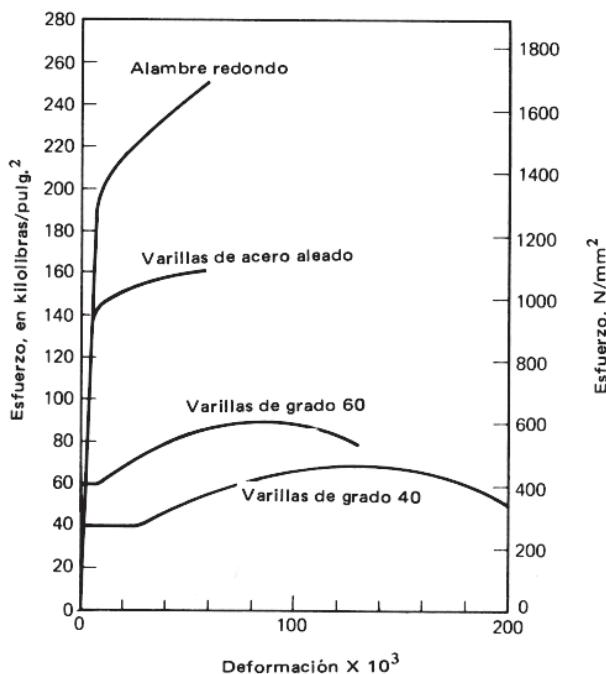


Gráfico 1. Curvas comparativas de esfuerzo-deformación para acero de refuerzo y para acero de pre esfuerzo.

Fuente: (Nilson, Diseño de estructuras de Concreto Presforzado, 1982).

En el acero de refuerzo ordinario, tipificado aquí mediante los grados 40 y 60, existe una respuesta inicial elástica hasta un punto de fluencia marcadamente definido, más allá del cual, ocurre un incremento substancial en la deformación sin que venga aparejado un incremento en el esfuerzo. Si se incrementa la carga, esta mesa de fluencia es seguida por una región de endurecimiento por deformación, durante el cual se obtiene una relación pronunciadamente no lineal entre el esfuerzo y la deformación. Eventualmente ocurrirá la ruptura del material, a una deformación bastante grande de alrededor del 13 por ciento para varillas del grado 60 y del 20 por ciento para varillas del grado 40.



El contraste con los aceros de pre esfuerzo es notable. Estos no presentan un esfuerzo de fluencia bien definido. El límite proporcional para alambres redondos (y para cables hechos con tales alambres) está alrededor de las 200 kilolibras/pulg² o sea 5 veces el punto de fluencia de las varillas del grado 40. Con carga adicional, los alambres muestran una fluencia gradual, aunque la curva continúa elevándose monótonamente hasta la fractura del acero. El esfuerzo de falla para el alambre que se muestra es de 250 kilolibras/pulg.² (1720 N/mm²) casi cuatro veces que el de las varillas de grado 40, pero la deformación en la falla es solamente la tercera parte. Las varillas de aleación tienen características similares a aquellas de los alambres redondos o de los cables trenzados, pero sus límites proporcionales y resistencias son 30 a 40 por ciento menores.

2.1.3.1.3. Relajamiento del acero

Cuando al acero del pre esfuerzo se le esfuerza hasta los niveles que son usuales durante el tensado inicial y al actuar las cargas de servicio, se presenta una propiedad que se conoce como relajamiento. El relajamiento se define como la pérdida de esfuerzo en un material esforzado mantenido con longitud constante. (El mismo fenómeno básico se conoce con el nombre de flujo plástico cuando se define en términos de un cambio de longitud de un material que está sujeto a esfuerzo constante). En los miembros de concreto pre esforzado, el flujo plástico y la contracción del concreto, así como las fluctuaciones de las cargas aplicadas producen cambios en la longitud del tendón. Sin embargo, cuando se calcula la pérdida en el esfuerzo del acero debida al relajamiento, se puede considerar la longitud constante.

El relajamiento no es un fenómeno que ocurra en un corto periodo de tiempo. De la evidencia que se tiene disponible, resulta que continúa casi indefinidamente, aunque a una velocidad decreciente. Debe de tomarse en cuenta en el diseño ya que produce una pérdida significativa en la fuerza pretensora.

La magnitud del relajamiento varía dependiendo del tipo y del grado del acero.

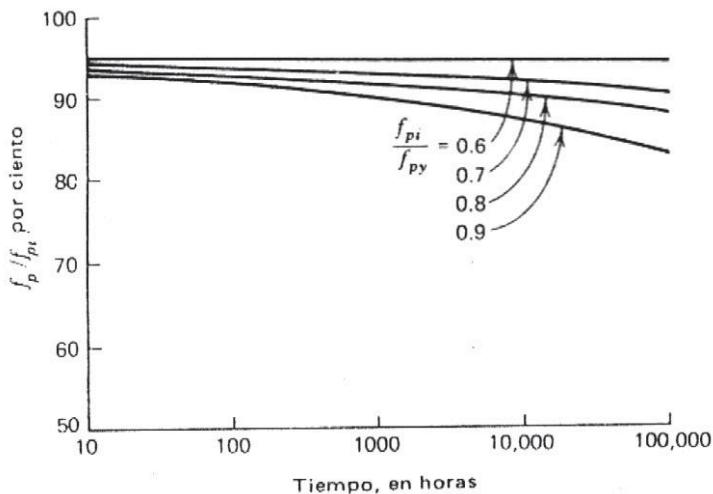


Gráfico 2. Curvas de relajamiento del acero para alambres y cables relevados de esfuerzo

Fuente: (Nilson, Diseño de estructuras de Concreto Presforzado, 1982).

El término f_{pi} puede tomarse como el esfuerzo en el acero en el momento de la liberación. En algunos casos las pérdidas por relajamiento se han reducido mediante un pre alargamiento, constituyendo esto una técnica mediante la cual el esfuerzo en el acero se incrementa hasta un nivel más alto que el esfuerzo inicialmente propuesto, manteniéndose en aquel nivel durante un corto lapso de tiempo y reduciéndose luego hasta el nivel inicialmente propuesto. Sin embargo, como el nivel práctico de esfuerzo inicial es más o menos 70 por ciento de la resistencia del acero, no es posible sobre esforzarlo en más de un 15 por ciento. Sobre la base de la evidencia disponible, resulta que el pre alargamiento es de poco efecto cuando su duración se limita a sólo unos cuantos minutos.

Se pueden conseguir alambres y cables especiales con bajo relajamiento. De acuerdo con las Especificaciones ASTM A416 y A421, tales aceros deberán producir un relajamiento después de 1000 hrs. no mayor de 2.5 por ciento cuando se carguen al 70 por ciento de la resistencia especificada a la tensión, y no más del 3.5 por ciento cuando se carguen hasta el 80 por ciento de la resistencia especificada a la tensión. Las pérdidas para alambres y cables de bajo relajamiento debidas a este concepto, pueden tomarse como alrededor del 25 por ciento de las pérdidas en alambres y cables normales.

2.1.3.2. Concreto de alta resistencia

Por muchas razones el concreto que se usa en la construcción pre esforzada se caracteriza por una mayor resistencia que aquel que se emplea en concreto reforzado ordinario. Se le



somete a fuerzas más altas, y por lo tanto un aumento en su calidad generalmente conduce a resultados más económicos. El liso de concreto de alta resistencia permite la reducción de las dimensiones de la sección de los miembros a un mínimo. Se logran ahorros significativos en carga muerta, y grandes claros resultan técnica y económicamente posibles las objetables deflexiones y el agrietamiento, que de otra manera estarían asociados con el empleo de miembros esbeltos sujetos a elevados esfuerzos, pueden controlarse con facilidad mediante el pre esfuerzo.

Existen otras ventajas. El concreto de alta resistencia tiene un módulo de elasticidad más alto que el concreto de baja resistencia, de tal manera que se reduce cualquier pérdida de la fuerza pretensora debida al acortamiento elástico del concreto. Las pérdidas por flujo plástico que son aproximadamente proporcionales a las pérdidas elásticas, son también menores. Los elevados esfuerzos de aplastamiento que existen en las inmediaciones de los anclajes de los tendones de miembros post-tensados se pueden tomar más fácilmente, y se pueden reducir el tamaño y el costo de los dispositivos de anclaje. En el caso de los elementos pretensados, una mayor adherencia resulta en una reducción de la longitud de desarrollo requerida para transmitir la fuerza pretensora de los cables al concreto. Finalmente, un concreto de alta resistencia a la compresión, tiene también una mayor resistencia a la tensión, de tal manera que se disminuye la formación de grietas debidas a la flexión y a la tensión diagonal.

2.1.3.2.1. Concreto sujeto a compresión uniaxial

El concreto es útil principalmente en compresión, y en las secciones que rigen el diseño de los miembros, está sujeto a un estado de esfuerzos que es aproximadamente uniaxial. Consecuentemente la curva de esfuerzo -deformación uniaxial es de fundamental interés. Tal curva se obtiene cargando cilindros estándar paralelamente a sus ejes a velocidades prescritas. El Gráfico 3 muestra un juego típico de tales curvas. Todas estas curvas tienen una forma similar. La respuesta es razonablemente elástica para cargas menores que más o menos la mitad de la máxima. Los concretos de más alta resistencia tienen más alto módulo de elasticidad, el cual se mide mediante la pendiente de la curva en el origen. Además, deberá notarse que los concretos de más alta resistencia son más frágiles, esto es, ellos se fracturan a una deformación menor que a la que se fracturan los concretos de más bajas resistencia. De acuerdo con la práctica actual en el diseño, la deformación límite para compresión uniaxial se toma como 0.003. Esto es completamente justificable para concretos que tengan una resistencia a la compresión de 6000 lb/pulg.² o menos (41



N/mm²), pero está algo fuera del lado conservador para materiales de mayor resistencia. Todas las curvas alcanzan su máximo esfuerzo es a una deformación de más o menos 0.002. Las curvas de esfuerzo-deformación en compresión para concretos ligeros presentan las mismas características que las de los concretos con densidad normal, y no se hace ninguna distinción especial entre los dos tipos en el diseño ordinario.

Debe ponerse énfasis en que la forma exacta de la curva esfuerzo - deformación para cualquier concreto es altamente dependiente de variables tales como la velocidad de carga el equipo específico de prueba el método de prueba, y el tamaño y forma del espécimen. Las relaciones que se muestran en el Gráfico 3, son típicas únicamente de resultados de pruebas corridas con procedimientos estándar actuales. En la estructura real, se pueden obtener resultados algo diferentes. Afortunadamente, los procedimientos de diseño han resultado ser insensibles a la forma de la curva esfuerzo-deformación.

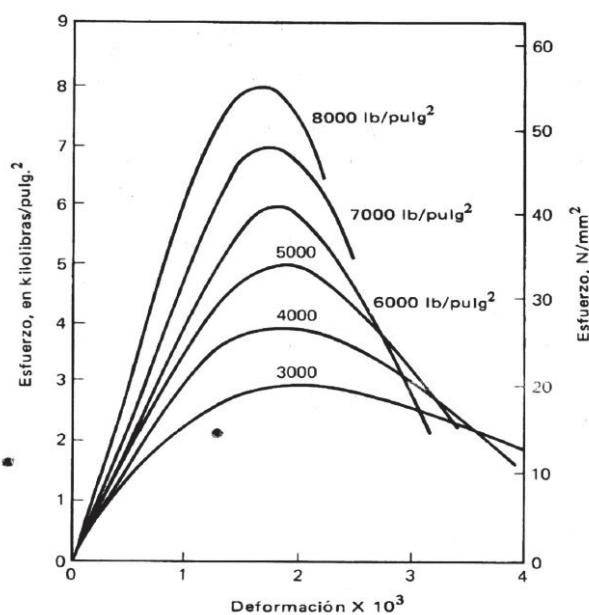


Gráfico 3. Curvas de esfuerzo-deformación típicas para concreto sujeto a compresión axial

Fuente: (Nilson, Diseño de estructuras de Concreto Presforzado, 1982).

Se han propuesto muchas relaciones que expresan al módulo de elasticidad en función de la resistencia del concreto. Puede calcularse con razonable aproximación mediante una ecuación propuesta por Pauw y que se encuentra incluida en el Código del Instituto Americano del Concreto:

$$E_c = 15,000 \cdot \sqrt{f'_c} \quad (1.0)$$



Cuando al concreto se le comprime en una dirección, al igual que ocurre con otros materiales, éste se expande en la dirección transversal a la del esfuerzo aplicado. La relación entre la deformación transversal y la longitudinal se conoce como relación de Poisson. Es significativa solamente dentro del rango elástico, para esfuerzos menores más o menos la mitad de la resistencia del concreto. En este rango la relación de Poisson del concreto varía entre 0.15 y 0.20.

La resistencia del concreto varía con su edad, siendo el aumento de su resistencia más rápido al principio, tomándose luego mucho más lento. Esta variación de la resistencia es especialmente importante en el diseño y fabricación de miembros de concreto pre esforzado, debido a que las elevadas cargas se pueden producir a muy temprana edad por el acero tensado. En todos los tipos de construcción pre esforzada, pero particularmente en miembros producidos en plantas de pretensado, se siguen métodos especiales para garantizar el desarrollo rápido de la resistencia a la compresión.

2.1.3.2.2. Deformación en el concreto dependiente del tiempo.

La deformación del concreto dependiente del tiempo debida al flujo plástico y a la contracción, es de importancia crucial en el diseño de estructuras de concreto pre esforzado, debido a que estos cambios volumétricos producen una pérdida en la fuerza pretensora y debido a que ellos producen cambios significativos en la deflexión. Una estimación cuidadosa de los efectos del flujo plástico y la contracción requiere de una información de ingeniería que relacione tales cambios de volumen con el tiempo la intensidad del esfuerzo, la humedad y otros factores. Debido a esa importancia, tanto el flujo plástico como la contracción, han sido objeto de investigación exhaustiva durante mucho tiempo. Los estudios más productivos fueron experimentales, y de tales investigaciones se derivaron las relaciones funcionales necesarias.

- Flujo plástico

El flujo plástico es la propiedad de muchos materiales mediante la cual ellos continúan deformándose a través de lapsos considerables de tiempo bajo un estado constante de esfuerzo o carga. La velocidad del incremento de la deformación es grande al principio, pero disminuye con el tiempo, hasta que después de muchos meses alcanza un valor constante asintóticamente.

Se ha encontrado que la deformación por flujo plástico en el concreto depende no solamente del tiempo, sino que también depende de las proporciones de la mezcla, de la humedad, de las condiciones del curado, y de la edad del concreto a la cual comienza a



ser cargado. La deformación por flujo plástico es casi directamente proporcional a la intensidad del esfuerzo. Por lo tanto, es posible relacionar a la deformación por flujo plástico con la deformación elástica inicial mediante un coeficiente de flujo plástico.

- Contracción

Las mezclas para concreto normal contienen mayor cantidad de agua que la que se requiere para la hidratación del cemento. Esta agua libre se evapora con el tiempo la velocidad y la terminación del secado dependen de la humedad, la temperatura ambiente, y del tamaño y forma del espécimen del concreto. El secado del concreto viene aparejado con una disminución en su volumen, ocurriendo este cambio con mayor velocidad al principio que al final, en que se alcanzan las dimensiones límite asintóticamente.

La evidencia de las pruebas no muestra una variación consistente entre concretos de peso normal, fabricados con arena ligera, y en general todos los concretos ligeros, así como también no se presenta una diferencia consistente entre concretos fabricados con cemento Tipo I.

2.1.4. Diseño de viguetas pre esforzadas

2.1.4.1. Perdidas de pre esfuerzo

La falta de éxito experimentada en los primeros intentos para pre esforzar el concreto, se debieron, en la mayoría de los casos, a la falla en la apreciación de la importancia de las perdidas parciales inevitables de la fuerza pretensora.

Las dudas con relación a la permanencia del pre esfuerzo persistieron hasta los años 40. Fue solo hasta el dramático éxito de los puentes de Freyssinet, que la ingeniería comenzó a aceptar que las pérdidas del pre esfuerzo podían calcularse y tomarse en cuenta en el diseño, y que su efecto podría minimizarse mediante la selección adecuada de los materiales apropiados.

2.1.4.1.1. Clasificación de las perdidas

Las pérdidas de pre esfuerzo se agrupan en dos categorías:

Las llamadas instantáneas, que se llevan a cabo en la elaboración del miembro, como las perdidas por deslizamiento del anclaje, pérdidas por fricción y perdidas por acortamiento elástico del concreto. Dichas perdidas llevarán el esfuerzo inicial que transmite el gato a una fuerza pretensora inicial. Esta tensión que designara como P_i .

Las relacionadas con el transcurso del tiempo y que van disminuyendo la fuerza pretensora inicial, entre estas tenemos: perdida por flujo plástico, perdida por relajación del acero y perdida por contracción del concreto. Después de estas pérdidas tendremos al



miembro sujeto a una fuerza pretensora efectiva denominada P_e ; la relación que guarda con la fuerza inicial se llama relación de efectividad (R).

$$P_e = R \cdot P_i \quad (1.1)$$

Una diferencia considerable entre los cálculos y las perdidas reales afectará únicamente el comportamiento del elemento bajo condiciones de servicio y las uniones. En el nivel de carga de servicio, la sobreestimación de las perdidas redundará en contra flecha excesiva y movimiento horizontal, mientras que la subestimación de las mismas dará como resultado grandes deflexiones y agrietamientos. Ninguna de las condiciones anteriores afecta de manera apreciable la resistencia última del miembro.

2.1.4.1.1.1. Perdidas por deslizamiento en el anclaje (PDA)

Al transmitir la fuerza pretensora del gato al elemento, habrá un reacomodo de la cuña antes de sujetar con firmeza el tendón que provocará el deslizamiento.

La ecuación para su cálculo es:

$$PDA = \frac{\Delta l}{l} \cdot E_p \quad (1.2)$$

Δl = cantidad del deslizamiento

l = longitud del tendon

E_p = Modulo de elasticidad del acero de presfuerzo.

El porcentaje de pérdida de fuerza pretensora disminuye conforme aumenta la longitud de tendon, puesto que la pérdida se origina por una magnitud total definida de acortamiento. Debido a esto, la perdida por deslizamiento del anclaje se puede despreciar en viguetas pretensadas, las cuales se cuelan en largas camas de colado.

2.1.4.1.1.2. Perdida por acortamiento elástico del concreto (PAE)

Cuando el pre esfuerzo se transfiere al concreto, este se acorta elásticamente al ser comprimido, por consiguiente, el acero también se acortará provocando la perdida de tensión.

El acortamiento elástico será igual a:

$$PAE = n \cdot f_{cs} \quad (1.3)$$

En donde:

n = relacion modular entre acero y concreto

f_{cs} = esfuerzo que provoca la fuerza pretensora incial en el centroide del acero.



$$f_{cs} = -\frac{P_i}{A_v} \left(1 + \frac{e^2}{r^2} \right) + \frac{M_o \cdot e}{I} \quad (1.4)$$

P_i = fuerza pretensora inicial, supuesta como $0.9P_j$

A_v = area de sección del concreto

e = excentricidad

M_o = momento debido al peso propio del miembro

r = radio de giro de la sección

2.1.4.1.1.3. Pérdidas por flujo plástico (PFP)

Tiene su origen en la propiedad del concreto de continuar deformándose a través del tiempo al encontrarse bajo un estado constante de esfuerzos. Este tipo de perdida depende de muchos factores entre los que están: El tiempo del elemento, calidad de la mezcla, proceso de curado y edad en que empieza a ser cargado.

La pérdida se asocia con:

$$PFP = C_u \cdot n \cdot f_{cs} \quad (1.5)$$

$$C_u = \text{coeficiente ultima de flujo plastico} = \frac{\epsilon_{cu}}{\epsilon_{ci}}$$

ϵ_{cu} = deformación adicional con el tiempo

ϵ_{ci} = deformación elástica inicial.

“Los valores típicos de Cu se encuentran en el rango de 2 a 4. Cuando no se dispone de información específica, se recomienda un valor promedio de 2.35” (Nilson, Diseño de estructuras de Concreto Presforzado, 1982)

2.1.4.1.1.4. Perdidas por contracción del concreto (PRC)

Es la disminución de volumen por el secado del concreto, su valor se asocia con:

$$PRC = E_p \cdot \epsilon_{sh} \quad (1.5)$$

ϵ_{sh} = Deformación de concreto en un tiempo dado

El valor de ϵ_{sh} cuando el curado es con humedad se determina como:

$$\epsilon_{sh} = -0.51 \times 10^{-3} \cdot Ks \cdot Kh \cdot \left(\frac{t}{35 + t} \right) \quad (1.6 a)$$

Cuando el curado es a vapor, la deformación es igual a:

$$\epsilon_{sh} = -0.56 \times 10^{-3} \cdot Ks \cdot Kh \cdot \left(\frac{t}{55 + t} \right) \quad (1.6 b)$$

t = tiempo en días que el concreto ha estado secando cuando se va cargar.

Kh = factor por humedad relativa, de acuerdo a la tabla.



Tabla 5. Factor por humedad relativa Kh

| Prom. Hum. Relativa en el ambiente | Kh |
|---------------------------------------|------|
| 40 % | 1.43 |
| 50 % | 1.29 |
| 60 % | 1.14 |
| 70 % | 1.00 |
| 80 % | 0.86 |
| 90 % | 0.43 |
| 100 % | 0 |

Fuente: (Nilson, Diseño de estructuras de Concreto Presforzado, 1982).

Ks = relación del volumen con respecto al área del elemento.

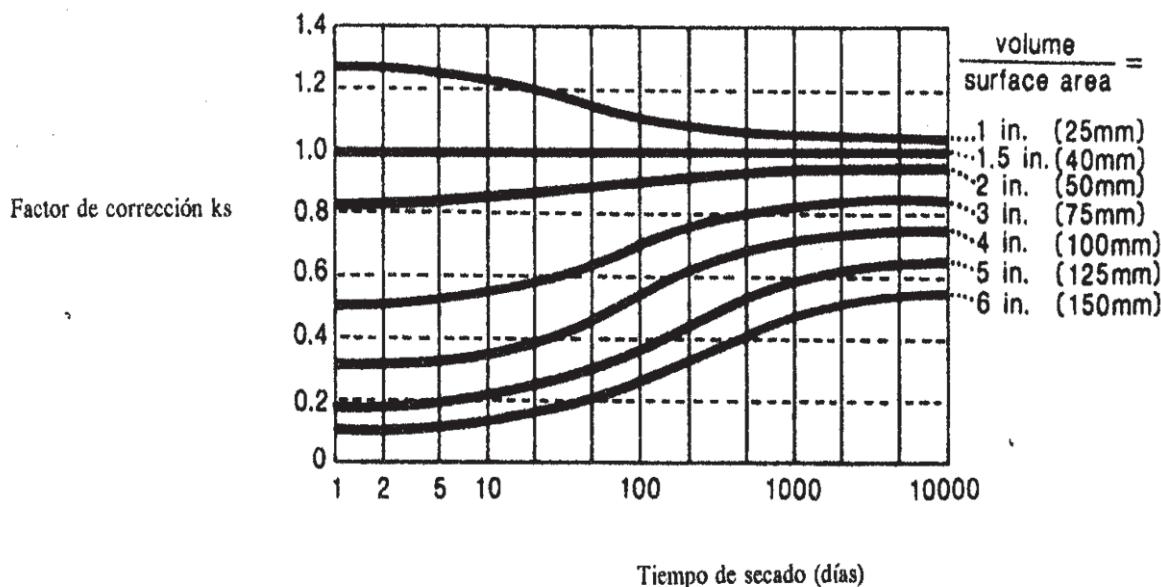


Gráfico 4. Factor de corrección K_s

Fuente: (Nilson, Diseño de estructuras de Concreto Presforzado, 1982).

“Se recomienda un valor de 800×10^{-6} para concreto curado con humedad y de 730×10^{-6} para el concreto curado a vapor, si no se dispone de información local” (Nilson, Diseño de estructuras de Concreto Presforzado, 1982).

La retracción es una de las perdidas más difíciles de conocer, pues depende de factores que varían de región en región, como son: la composición del concreto, la cantidad de



agua en la mezcla, el tipo de curado, la temperatura ambiente, las dimensiones del elemento, la relación volumen área, etc.

2.1.4.1.1.5. Perdidas por relajamiento del acero (PRA)

Es la perdida de esfuerzo en el acero, asociada con el tiempo cuando se mantiene una longitud constante. La magnitud del relajamiento varía dependiendo del tipo y del grado del acero, pero los parámetros más significativos son el tiempo y la intensidad de la fuerza pretensora inicial.

Las normas americanas no consideran el tipo de acero en el cálculo de la perdida de relajamiento, no así el reglamento francés, sin embargo, considerando una pérdida de relajación del 8% a las mil horas, para el alambre utilizado en la ciudad (dato del fabricante), encontramos resultados muy aproximado entre las dos ecuaciones; por lo que en este capítulo emplearemos la expresión americana.

Esta pérdida se puede estimar con la siguiente ecuación:

$$PRA = fpi \cdot \frac{\log t}{10} \left(\frac{fpi}{fpy} - 0.55 \right) \quad (1.7)$$

La relajación es mínima con esfuerzos iniciales pequeños, cuando son menores que 0.55 fpy se desprecia la perdida por relajación. La temperatura del acero influye determinantemente en la magnitud de la relajación. Las ecuaciones anteriores fueron determinadas para una temperatura estándar de 20°C, y pueden ser aplicadas conservadoramente para temperaturas más bajas. Para temperaturas mayores, deben considerarse incrementos en la relajación.

2.1.4.2. Análisis y diseño de las viguetas pre esforzadas.

2.1.4.2.1. Análisis y diseño bajo flexión

Por el origen y el uso dado a la vigüeta pretensada, generalmente se encuentra sometida a un estado de flexo-compresión. En esta tesis, el análisis o diseño se realizará por flexión y después se revisará el funcionamiento del elemento bajo cortante y resistencia ultima.

Existen tres etapas de carga de importancia en un miembro pretensado:

1. En el momento de la transferencia de tensión al concreto.
2. Al aplicar las cargas de servicio.
3. Al aplicar la carga factorizada.

Las dos primeras condiciones se analizan con el método elástico, que se basa en el cálculo de esfuerzos del elemento en las fibras inferiores y superiores (que son las sometidas a mayores esfuerzos en las etapas críticas para compararlos con los esfuerzos) en las etapas



críticas para compararlos con los esfuerzos permisibles que establece el reglamento del ACI.

Por otro lado, la carga factorizada provoca esfuerzos que sobrepasan el límite de fluencia, teniendo que utilizarse el método de resistencia a la ruptura.

Ambas revisiones son necesarias en cualquier análisis que se efectué. Al hacer un diseño elástico, es necesario verificar que la viga pueda soportar sobrecargas, y cuando se emplea el cálculo a la ruptura, debe aplicarse la teoría de esfuerzos admisibles para comprobar si bajo determinadas condiciones de carga, la sección resulta sobre esforzada y con deflexiones excesivas.

2.1.4.2.1.1. Análisis bajo esfuerzos permisibles

El método supone esfuerzos elásticos del concreto. La fuerza pretensadora inicial produce esfuerzos de compresión y un momento negativo, tal como se indica en la Figura 2.

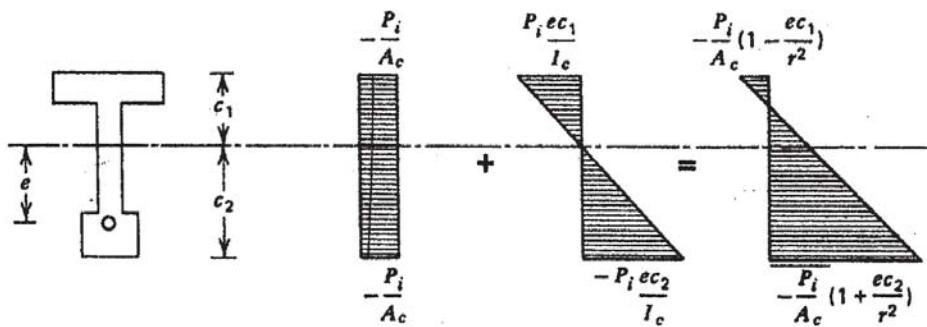


Figura 2. Esfuerzos producidos por el pre esfuerzo inicial

Fuente: (Nilson, Diseño de estructuras de Concreto Presforzado, 1982).

Cuando aplicamos el pre esfuerzo P_i al concreto, los esfuerzos en la fibra superior (f_1) e inferior (f_2), son la suma de:

$$f_1 = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 - \frac{e c_1}{r^2} \right) \quad (1.8 a)$$

$$f_2 = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 + \frac{e c_2}{r^2} \right) \quad (1.8 b)$$

Como el miembro provoca con su peso, un momento flector inverso al originado por el pre esfuerzo, tendremos que inmediatamente después de liberado el acero:

$$f_1 = -\frac{P_i}{A_v} \left(1 - \frac{e c_1}{r^2} \right) - \frac{M_o}{S_1} \quad (1.9 a)$$

$$f_2 = -\frac{P_i}{A_v} \left(1 + \frac{e c_2}{r^2} \right) + \frac{M_o}{S_2} \quad (1.9 b)$$

En las ecuaciones anteriores:



S = módulo de sección.

e = excentricidad del centroide del concreto al centroide del acero.

Av = área de la sección transversal de concreto.

I = Inercia de la sección del concreto.

Mo = Momento flector debido al peso propio.

El estado anterior se muestra en la Figura 3.

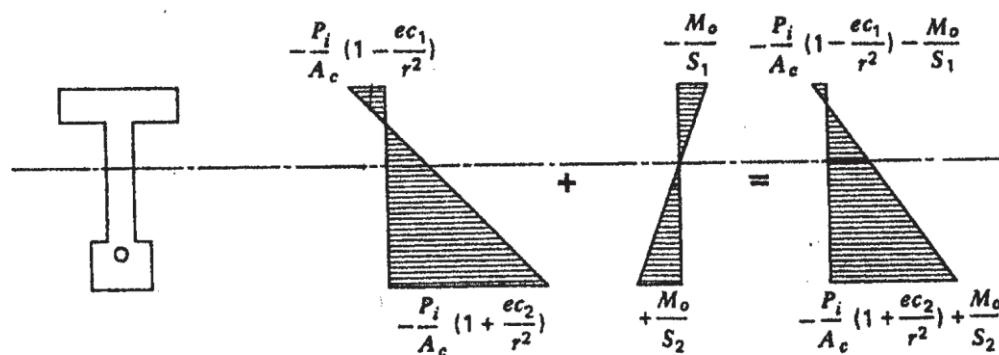


Figura 3. Esfuerzos producidos por pre esfuerzo y peso propio

Fuente: (Nilson, *Diseño de estructuras de Concreto Presforzado*, 1982).

El primer estado de carga crítico es diferente para vigas que tienen tendones con perfil parabólico con excentricidad nula en los apoyos y aquellas en las que la excentricidad permanece constante.

Cuando la excentricidad es variable, los esfuerzos permisibles se comparan con los esfuerzos producidos en la sección de máximo momento debido al peso propio de la viga, este momento reduce los esfuerzos que se presentan en la viga, y si bien es cierto que dicho momento decrece cerca de los apoyos también la excentricidad se reduce, haciendo confiable el diseño.

En una viga con excentricidad constante, los esfuerzos en donde el peso propio provoca el mayor momento son sobrepasados en los apoyos, porque el efecto de la fuerza pretensadora no cambia. Por esto, los esfuerzos permisibles deben compararse con los esfuerzos iniciales que no incluyen la acción del peso propio.

Existen después del estado inicial varias condiciones de carga, pero es difícil que alguna de ellas controle el diseño. El siguiente estado importante, es entonces, la etapa en la que se aplican las cargas de servicio con la fuerza pretensadora inicial ya disminuida a causa de las perdidas.

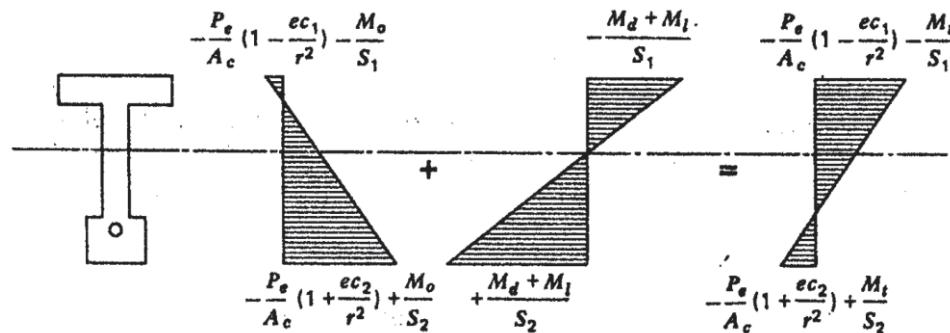


Figura 4. Esfuerzos producidos por el pre esfuerzo y las cargas de servicio

Fuente: (Nilson, *Diseño de estructuras de Concreto Presforzado*, 1982).

$$f_1 = -\frac{Pe}{A_v} \cdot \left(1 - \frac{e \cdot c_1}{r^2}\right) - \frac{M_o}{S_1} + \frac{(M_d + M_l) \cdot (Ycc - hv)}{I_c} \quad (1.10 a)$$

$$f_2 = -\frac{Pe}{A_v} \cdot \left(1 + \frac{e \cdot c_2}{r^2}\right) + \frac{M_o}{S_2} + \frac{(M_d + M_s) \cdot (Ycc)}{I_c} \quad (1.10 b)$$

2.1.4.2.1.2. Esfuerzos permisibles en el concreto

Después de obtenidos los esfuerzos en los estados de carga más importantes, compararán con los siguientes esfuerzos permisibles.

Tabla 6. Esfuerzos admisibles en el concreto en elementos pre esforzados sometidos a flexión.

- | |
|---|
| <p>1. Esfuerzo inmediatamente después de la transferencia del pre esfuerzo (antes de que ocurran las pérdidas del pre esfuerzo).</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Esfuerzo de compresión en fibras extremas $0.6f'ci$ b. Esfuerzo de tensión en fibras extremas, con excepción de lo permitido en c. $0.8\sqrt{f'ci}$ c. Esfuerzo de tensión de fibras extremas en los extremos de miembros simplemente apoyados $1.6\sqrt{f'ci}$ |
| <p>2. Los esfuerzos bajo cargas de servicio (después de considerar todas las pérdidas de pre esfuerzo) no deben de exceder los siguientes valores:</p> <ul style="list-style-type: none"> a. Esfuerzos de compresión en fibras extremas $0.45f'c$ b. Esfuerzos de tensión en fibras extremas en la zona de tensión pre comprimida $1.6\sqrt{f'c}$ |



- c. **Esfuerzos de tensión en fibras extremas de la zona de tensión pre comprimida de los miembros (excepto en sistemas de losas armadas en dos sentidos) en las que el análisis basado en la sección transformada agrietada y en las relaciones bilineales de momento deflexión demuestre que las deflexiones a lo largo plazo, así como las instantáneas satisfechas los requerimientos que se establecen en el código ACI 3.2 $\sqrt{f'c}$**
3. **Los esfuerzos admisibles en el concreto, determinados anteriormente, pueden excederse si se demuestra mediante ensayo o análisis que el comportamiento no se ver afectado.**

Fuente: Código ACI 18.4

Aparte de los esfuerzos permisibles que publica el ACI, se puede utilizar el código CSA, el cual introduce un factor que depende de la densidad del concreto. Para concreto normal, las diferencias no son significativas.

Los valores máximos a compresión son más altos en las condiciones iniciales que en las finales, esto se debe a que, en la zona de tracción pre comprimida, las compresiones obtenidas por el pre esfuerzo son consumidas por las tracciones debidas a las cargas. Existen pues, solo con carácter provisional.

2.1.4.2.1.3. Esfuerzos permisibles en el acero

Al adoptar los valores permisibles en los alambres o torones, lo esencial es mantener en reserva una capacidad de deformación suficiente del acero, comprendida entre el esfuerzo de fluencia y el de rotura para no estar a merced de una rotura brutal sin advertencia. Es incorrecto tensar los aceros a valores muy próximos a su límite de rotura, ya que no todos toman la misma fracción del esfuerzo total. El código ACI limita las tensiones en el acero:

1. Debidos a la fuerza de tensión del gato 0.80 f_{pu} ó 0.94 f_{py}
2. Tendones pretensados, inmediatamente después de la transferencia del pre esfuerzo 0.70 f_{pu}
3. Tendones postensado, inmediatamente después del anclaje del tendón 0.70 f_{pu}

2.1.4.2.2. Criterios de diseño

Dado que una de las ventajas del pre esfuerzo es mejorar las condiciones de servicio, es recomendable diseñar bajo el método de esfuerzos permisibles para después únicamente revisar bajo carga de ruptura.



El diseño por esfuerzos permisibles se puede realizar basándose en los módulos de sección inferior y superior para dimensionar la sección transversal; después de esto se calcula la fuerza pretensadora inicial optima con ayuda del esfuerzo centroidal y finalmente se encuentra el valor de la excentricidad.

Existen otros métodos analíticos, sin embargo, para el diseño de la vigueta pretensada, se escogerá el método de aproximaciones sucesivas a raíz de lo siguiente:

- Las camas de colado para este tipo de pre esforzado no permiten grandes variaciones en la colocación de los alambres, por tanto, la excentricidad se controla con la adición de uno o varios alambres por encima del eje centroidal.
- Por las reducidas dimensiones de la vigueta, la excentricidad obtenida en los cálculos analíticos, no permite que los alambres tengan en su parte inferior, el suficiente espesor para soportar las elevadas compresiones a que estará sujeto.
- Las compañías manejan un número reducido de secciones transversales, de acuerdo a los moldes con que cuentan. Cambiarlos a fin de optimizar los materiales bajo condiciones particulares, resulta, por lo general, antieconómico.
- Los módulos de sección inferior y superior de la sección compuesta, sobrepasan a los necesarios, debido a que el espesor de la losa estará regido por el esfuerzo del cortante a penetración.
- El módulo de la sección inferior, aun sin la acción compuesta, en ocasiones sobrepasa su valor teórico necesario a fin de que la vigueta de cabida al elemento aligerante.

Concluimos que en muchas ocasiones no utilizaremos la capacidad total de la sección; a primera vista, lo anterior provoca gastos mayores. Sin embargo, las limitaciones prácticas, como el cambio de excentricidad, la inversión que requiere un molde para concreto, o la dificultad para que los trabajadores manejen alambres de muchos diámetros diferentes, hacen funcional esta manera de trabajar.

2.1.4.2.3. Revisión del agrietamiento

Cuando se sobrepasan el momento de agrietamiento, el concreto comienza a fisurarse y el acero toma de improviso las tensiones que eran soportadas por el concreto. En este momento, la sección transversal ya no puede considerarse homogénea, debiendo revisarse las hipótesis iniciales.

$$\text{El módulo de ruptura es } f'r = 2\sqrt{f'c} \quad (1.11)$$



En una sección simple, el momento de agrietamiento se desprende de la siguiente igualdad:

$$f_2 = f'r = -\frac{P_e}{A_v} \left(1 + \frac{eC_2}{r^2} \right) + \frac{M_{cr}}{S_2}$$
$$M_{cr} = f'r \cdot S_2 + \frac{P_e}{A_v} \left(e + \frac{r^2}{C_2} \right) \quad (1.12)$$

En una sección compuesta, el momento de agrietamiento depende, además, de la magnitud de momento aplicado antes y después de que la sección empieza a trabajar en acción conjunta.

$$f_2 = f'r = -\frac{Pe}{A_v} \cdot \left(1 + \frac{e \cdot c_2}{r^2} \right) + \frac{M_o}{S_2} + \frac{M_d + M_l}{S_{2c}} \quad (1.13)$$

El momento de agrietamiento será $M_o + M_d + M_l$.

Revisar la sección bajo esfuerzos permisibles implica revisar por agrietamiento, pues el reglamento solo permite un esfuerzo máximo a tensión de $1.6\sqrt{f'c}$, es decir, menores al esfuerzo de ruptura del concreto.

2.1.4.2.4. Análisis y diseño por resistencia a la ruptura

La principal diferencia en el comportamiento de la viga de concreto pre esforzado con respecto a un concreto convencional, es que, bajo condiciones de servicio, es el brazo del par de interno compresión-tensión el que va incrementándose al requerirse mayor resistencia, permaneciendo constantes las fuerzas internas. Este comportamiento tiene un límite, cuando se sobrepasa, la viga muestra un comportamiento cada vez más arecido a un miembro de concreto reforzado, en el que van aumentando los esfuerzos de compresión tensión hasta llegar a la falla del miembro.

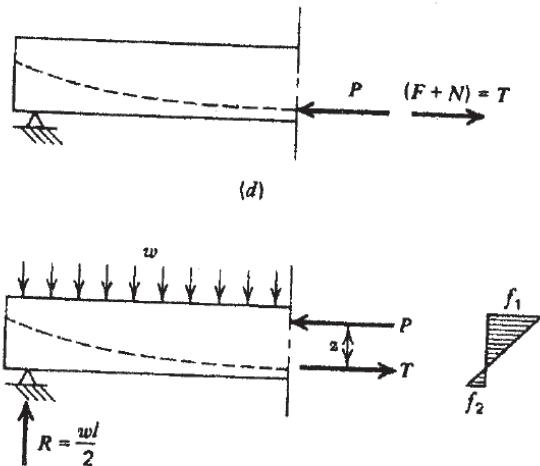


Figura 5. Fuerzas internas en una vigueta pre esforzada

Fuente: (Nilson, *Diseño de estructuras de Concreto Presforzado*, 1982).

P = resultante de esfuerzos normales de compresión en el concreto.

T = fuerza de tensión opuesta a P.

Los elementos pre esforzados se pueden dividir como en el caso de los miembros con refuerzo común en sobrereforzados y subrreforzados. A excepción de pocos casos, todas las vigas se diseñan subrreforzadas, de esta manera, el miembro fallara cuando el acero ya haya sobrepasado el límite de fluencia y se estén presentando grandes deformaciones. La diferencia entre una viga subrreforzada y otra sobrereforzada, estriba no solo en la cantidad de acero, sino que es importante la magnitud y excentricidad de la fuerza pretensora.

En términos generales, la viga falla por desintegración del concreto en la zona de compresión, pero si la viga es subrreforzada, esta desintegración, no significa que el concreto haya llegado a su límite de rotura, sino que es el acero, que, a punto de llegar a la ruptura, tiene alargamientos tan grandes que al concreto le es imposible seguirlos.

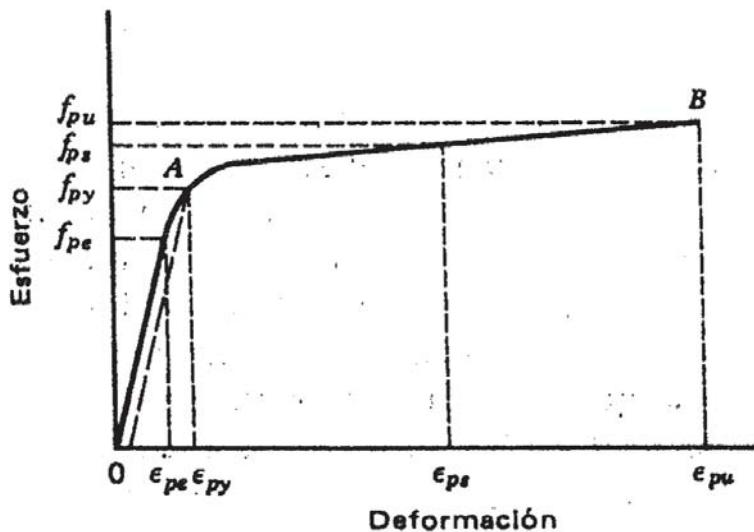


Gráfico 5. Diagrama de esfuerzo vs deformación del acero de alta resistencia.

Fuente: (Nilson, Diseño de estructuras de Concreto Presforzado, 1982).

f_{py}, ϵ_{py} = esfuerzo y deformacion de fluencia del acero.

f_{ps}, ϵ_{ps} = esfuerzo y deformacion del acero cuando la viga falla.

f_{pu}, ϵ_{pu} = esfuerzo y deformacion ultima del acero.

2.1.4.2.4.1. Calculo del momento resistente por compatibilidad de deformaciones

El análisis de compatibilidad de deformaciones, se basa en la suma de las deformaciones del acero en los tres estados que se observan en el diagrama.

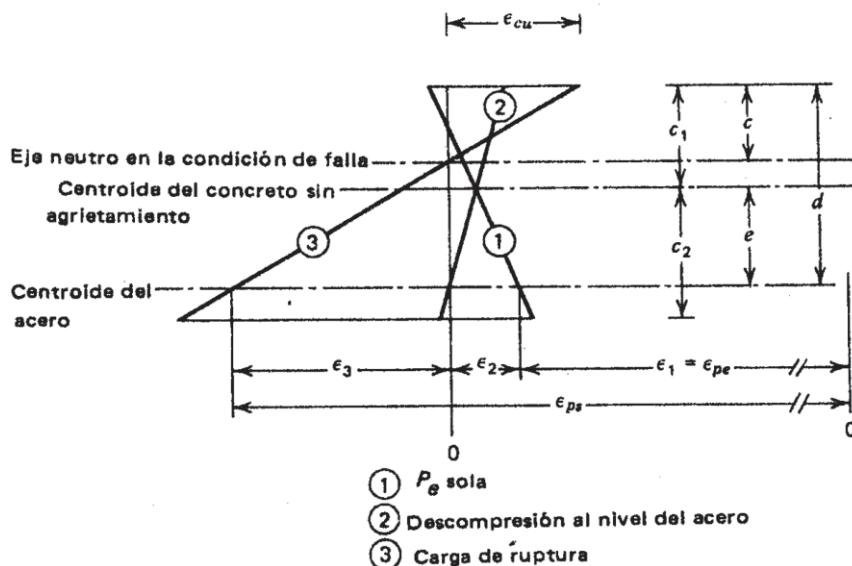


Figura 6. Análisis de deformaciones en una viguela pre esforzada

Fuente: (Nilson, Diseño de estructuras de Concreto Presforzado, 1982).



La ϵ_1 es resultado de la fuerza pretensora después de ocurridas todas las perdidas.

$$\epsilon_1 = \epsilon_{pe} = \frac{f_{pe}}{E_p} \quad (1.14)$$

La deformación dos, se debe a un pequeño incremento en el esfuerzo del acero a medida que se van agregando las cargas muertas y vivas. Suponiendo que se mantiene una adherencia perfecta entre acero y concreto tendremos que:

$$\epsilon_2 = \frac{Pe}{A_c E_c} \left(1 + \frac{e^2}{r^2} \right) \quad (1.15)$$

En el estado de falla, el eje neutro está a una distancia “c” por debajo de la parte superior de la sección. Por relación de triángulos.

$$\epsilon_3 = \epsilon_{cu} \frac{(d - c)}{c} \quad (1.16)$$

La deformación en la falla es la suma:

$$\epsilon_{ps} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \quad (1.17)$$

Por lo que $f_{ps} = E_p \cdot \epsilon_{ps}$.

La profundidad del bloque de esfuerzos se halla de la condición de equilibrio C-T. Suponiendo que la sección trabaja en forma rectangular.

$$a = \beta_1 \cdot c = \frac{A_s \cdot f_{ps}}{0.85 \cdot f'c \cdot b} \quad (1.18)$$

Como f_{ps} no se conoce aún, deberá proponerse un valor tentativo. Cuando se calcule la deformación total se comparará con la indicada por el diagrama esfuerzo-deformación del acero, para el valor supuesto de f_{ps} . De observarse diferencias notables se repite el procedimiento.

Finalmente, el momento resistente factorizado será:

$$\emptyset M_n = \emptyset \cdot A_p \cdot f_{ps} \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (1.19)$$

Donde:

\emptyset = es el factor de reducción de resistencia igual a 0.9 para el caso de flexión.

b = ancho efectivo del patín de compresión, se calcula de la misma manera que en el caso de la “semi-vigueta”.

2.1.4.2.4.2. Calculo del momento resistente con ecuaciones del ACI

Este procedimiento es empleado siempre que la sección es rectangular o con patín, ya que no existe necesidad de iterar. Las ecuaciones utilizadas son una aproximación al cálculo más exacto derivado de alcanzar la compatibilidad entre los esfuerzos y las deformaciones



en condiciones de carga de diseño. La fórmula aproximada puede subestimar la resistencia de las vigas con altos porcentajes de refuerzo.

El proceso que se sigue al utilizar las ecuaciones del ACI, es muy parecido al utilizado en el concreto reforzado, la diferencia principal estriba en el valor a tomar para el esfuerzo del acero en la falla. Para calcularlo, es necesario determinar antes el valor del pre esfuerzo efectivo. Teniendo este dato, el esfuerzo cuando la viga falle será el menor de:

$$- f_{ps} = 4200 + f_{pe} \quad (1.20\ a)$$

$$- f_{ps} = f_{py} \quad (1.20\ b)$$

- Si el pre esfuerzo efectivo f_{pe} es mayor que $0.5 f_{pu}$ y el tendón es adherido como en el caso de la vigueta pretensada, existe una tercera opción:

$$f_{ps} = f_{pu} \left(1 - 0.5 \delta_p \frac{f_{pu}}{f'_c} \right) \quad (1.21)$$

Donde:

$$\delta_p = \frac{A_p}{bd} \quad (1.22)$$

Al fraguar el concreto, la vigueta trabajara en acción compuesta con la losa. El eje neutro de la sección compuesta estará casi siempre en la losa colada en sitio, provocando que la viga trabaje en forma rectangular.

La profundidad del bloque de esfuerzos se estima con la ecuación, ya conocida:

$$a = \frac{A_s \cdot f_{ps}}{0.85 \cdot f'_c \cdot b}$$

En el supuesto de que "a" fuera mayor que el espesor de la losa "hf", se utilizarían las ecuaciones para vigas "T".

La resistencia nominal a la flexión será:

$$\emptyset M_n = \emptyset \cdot A_p \cdot f_{ps} \cdot \left(d - \frac{a}{2} \right)$$

Para determinar si la viga es subreforzada el código del ACI fija un límite al siguiente índice de refuerzo:

$$\delta_p \cdot \frac{f_{ps}}{f'_c}$$

Cuando el índice es menor de 0.30, la viga se considera subreforzada, este valor es estrictamente correcto cuando $f'_c = 352 \text{ kg/cm}^2$.

Si se sobrepasa esta frontera, el momento resistente en una viga rectangular será:

$$M_n = 0.25 \cdot f'_c \cdot b \cdot d^2 \quad (1.23)$$



2.1.4.2.5. Revisión por cortante

Existen pocas compañías que ofrezcan viguetas pretensadas con estribos. Hay varias razones para ello:

El código del ACI excluye del refuerzo mínimo por cortante a las nervaduras de entrepisos, porque es posible que exista una carga repartida entre zonas fuertes y débiles. Lo anterior significa que si el concreto soporta los esfuerzos cortantes no será necesaria la adición de estribos; lo cual suele suceder, tanto en vigas doble T, como en viguetas pretensadas.

La falla por cortante en vigas pre esforzadas se presenta de dos maneras: flexo-cortante y cortante en el alma.

Las grietas por flexión cortante se presentan generalmente en el tercio medio del claro, la grieta se propaga en forma inclinada y resulta de un esfuerzo cortante pequeño y de un esfuerzo de flexión dominante. Esta falla se presenta después que han ocurrido las grietas por flexión.

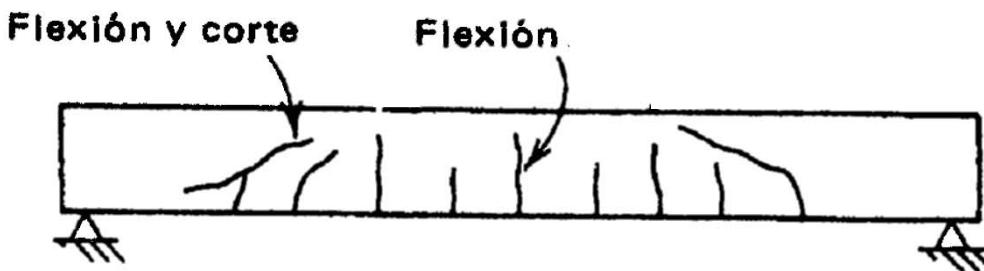


Figura 7. Grietas por flexión y corte en una viguela pre esforzada

Fuente: (Nilson, Diseño de estructuras de Concreto Presforzado, 1982)

La capacidad del concreto se calcula, para este tipo de falla de la siguiente manera:

$$Vci = 0.16 \cdot \sqrt{f'_c} \cdot bw \cdot d + \frac{Vu \cdot Mcr}{Mu} \quad (1.24)$$

Vu y Mu son el cortante y el momento factorizados.

Mcr = momento de agrietamiento.

Las grietas por cortante en el alma, se producen si la resistencia de la viga en tensión diagonal es menor que su resistencia en flexión. En este caso la falla es súbita y sin previo aviso.



Figura 8. Grietas por cortante en el alma

Fuente: (Nilson, Diseño de estructuras de Concreto Presforzado, 1982)

La contribución del concreto para este tipo de falla viene dada con la ecuación:

$$V_{cw} = (0.93\sqrt{f'_c} + 0.3f_{cc})bw.d + V_p \quad (1.25)$$

f_{cc} = esfuerzo a nivel del centroide del tendón.

V_p = componente vertical de la fuerza pretensora efectiva.

Al momento del análisis deberá tomarse como fuerza cortante la que resulte más pequeña, de acuerdo a las consideraciones vistas.

La determinación de V_{cw} y V_{ci} para un caso práctico involucra considerables cálculos. Consecuentemente, el código ACI da una expresión más simple para V_c que puede ser usada para miembros de concreto pretensado, en los que $f_{ps}/f_{pu} > 0.4$. La expresión es:

$$V_c = \left(0.16\sqrt{f'_c} + \frac{49V_{ud}}{M_u} \right) bw.d \quad (1.26)$$

2.1.4.2.6. Revisión de las deflexiones

Los aceros y concretos de mayores resistencias, han propiciado la construcción de miembros más esbeltos, así que el control de deflexiones y agrietamiento se ha vuelto más importante. En las primeras etapas, una sección puede tener resistencia suficiente para soportar las cargas, pero deformarse tanto que quede dañada permanentemente.

En el siguiente diagrama se observa la contra flecha natural que se presenta en el concreto preesforzado antes de que las cargas de servicio sean aplicadas. La línea punteada indica el valor que alcanzaría la deflexión inicial si no actuara de inmediato el peso propio. Por otro lado, cuando la viga sobrepasa el momento de agrietamiento aumenta rápidamente la deflexión porque el momento de inercia de la sección se va haciendo más pequeño.

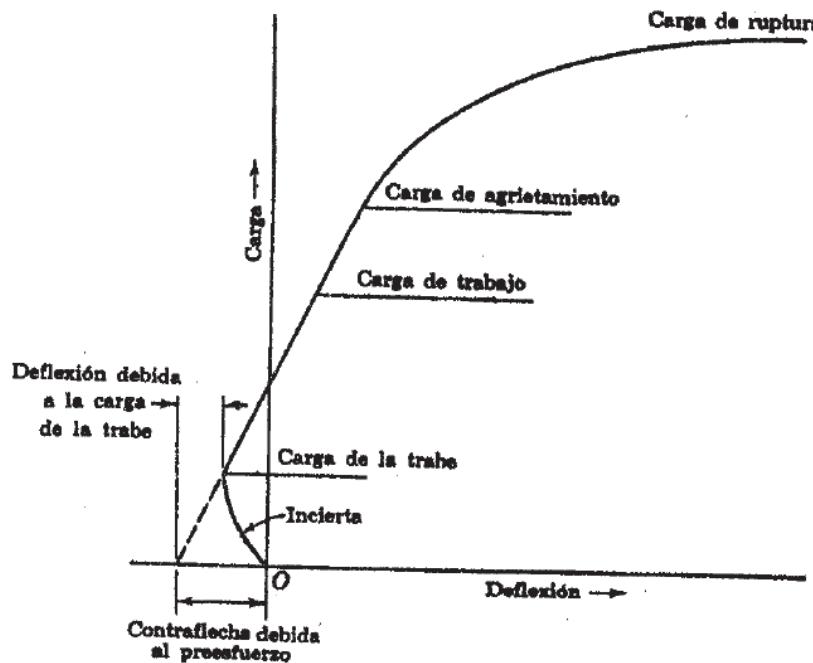


Gráfico 6. Deflexiones en una vigueta pre esforzada

Fuente: (Nilson, Diseño de estructuras de Concreto Presforzado, 1982).

Como ya vimos en la revisión del agrietamiento, una sección que satisfaga el diseño por esfuerzos permisibles no deberá tener fisuración, gracias a esto, es posible utilizar el momento de inercia total de la sección.

A secciones iguales las flechas de un elemento pre esforzado serán inferiores a las de un elemento de concreto armado. Lo anterior se debe a que, en una sección de concreto armado, solamente la sección ficticia de concreto a la compresión y el acero tensado entran en consideración. Además de esto, el concreto para pre esforzado tiene un módulo de elasticidad mayor que en el concreto reforzado. La deflexión también es menor, porque al momento de transferir la tensión al concreto en un pre esforzado, este adquirirá una contra flecha natural.

Debido a la contra flecha provocada por la fuerza pretensora inicial, los estados a considerarse son el inicial y cuando se aplica la carga de servicio bajo la fuerza pretensora efectiva y las modificaciones debidas al flujo plástico.

Inmediatamente después de ocurrido el pre esfuerzo, la deformación es:

$$\Delta = -\Delta_{pi} + \Delta_o \quad (1.27)$$

La curvatura ocasionada por el pre esfuerzo se puede subdividir en:



- a. La curvatura instantánea después de ocurrido P_i .
- b. El cambio de curvatura ocurrida por la pérdida de pre esfuerzo ocasionada por la relajación, la contracción y el flujo plástico.
- c. El cambio proveniente del flujo plástico del concreto sujeto a cargas de compresión.

$$\phi_{pc} = \phi_{pi} + d\phi_1 + d\phi_2 \quad (1.28)$$

La ecuación anterior puede redefinirse como:

$$\phi_{pc} = -\frac{P_i \cdot e}{E_c I_c} + \frac{(P_i - P_e)e}{E_c I_c} - \frac{(P_i + P_e)}{2} \frac{e}{E_c I_c} Cu \quad (1.29)$$

Entonces, las deflexiones causadas por el pre esfuerzo serán:

$$\Delta = \Delta_{pi} + (\Delta_{pi} - \Delta_{pe}) - \frac{\Delta_{pi} + \Delta_{pe}}{2} \cdot Ct \quad (1.30)$$

Donde $\Delta_{pe} = \Delta_{pi} \cdot \frac{P_e}{P_i}$ (1.30)

Considerando que las curvaturas causadas por el peso propio la carga muerta y parte de la carga viva, también serán afectadas por la fluencia plástica, podemos llegar a la siguiente ecuación para deformación total a largo plazo.

$$\Delta = -\Delta_{pe} - \frac{\Delta_{pi} + \Delta_{pe}}{2} \cdot Ct + (\Delta_o + \Delta_d + \Delta_{ls})(1 + Ct) + \Delta_I \quad (1.31)$$

La contra flecha y la deflexión debida a las cargas, dependerán de las condiciones de cada caso en particular. El valor del flujo plástico irá variando con el tiempo de acuerdo a la ecuación:

$$C_t = \frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} \cdot Cu \quad (1.32)$$

2.1.5. Procesos de elaboración

2.1.5.1. Proceso de elaboración de viguetas artesanales

2.1.5.1.1. Preparación del molde

La preparación del molde consiste en limpiarlo y evitar que tenga polvo o basura antes de la aplicación del desmoldante. Se aplica directamente al molde con estopa, trapeador o aspersor.



Figura 9. Preparación del molde. (De-Acero, 2010)

2.1.5.1.2. Corte del alambre

Con ayuda de unas cizallas se corta el alambre de pre esfuerzo a la longitud deseada, la cual es el largo de las mesas, más las puntas suficientes (1m) en cada extremo para anclarlo y tensarlo.



Figura 10. Corte del alambre a la longitud deseada. (De-Acero, 2010)

2.1.5.1.3. Colocación del alambre y separadores

Se tiende el alambre junto a las mesas de los moldes. Los alambres pasan a través de los agujeros de los separadores para ser colocados en cada línea de los moldes.

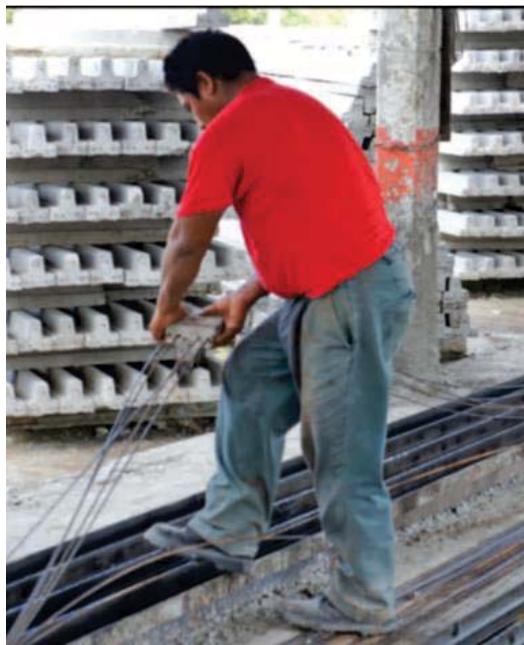


Figura 11. Colocación del alambre en los moldes. (De-Acero, 2010)

Los separadores son distribuidos en pares a lo largo de la mesa, y la distancia entre cada par, lo define la longitud de cada vigueta a producir. Entre cada par de separadores, se coloca una tapa entre los separadores para evitar la entrada de concreto.



Figura 12. Colocación de separadores. (De-Acero, 2010)

2.1.5.1.4. Anclaje de alambre

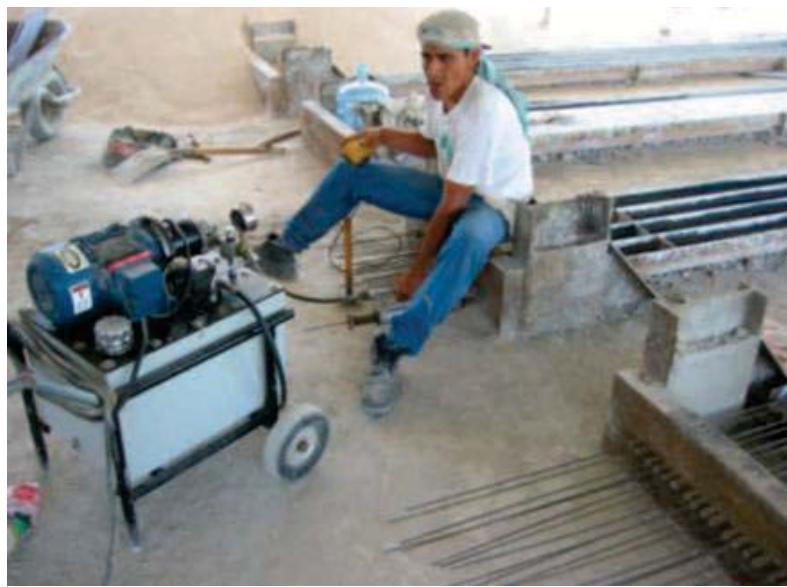
Los alambres se hacen pasar por los agujeros de la placa de anclaje y se aseguran con los barriletes y cuñas. Su función es fijar el alambre para poder ser tensado sin que se corra el alambre.



Figura 13. Anclajes del alambre mediante cuñas. (De-Acero, 2010)

2.1.5.1.5. Tensado de alambre

Los alambres son tensados con el equipo hidráulico (gato y bomba), y éste puede ser manual o eléctrico. Cada alambre se tensa a la misma presión y definido previamente por el diseño de la viga.



*Figura 14. Tensado del alambre, por medio de un equipo hidráulico. (De-Acero,
2010)*

2.1.5.1.6. Fabricación del concreto

El concreto se puede elaborar en la planta o se puede adquirir con una empresa que provee concreto calificado de la localidad.



Para la vigueta pretensada, se requiere un concreto con resistencia de f'_c de 350 kg/cm² o mayor.



Figura 15. Fabricación del concreto para las viguetas pre esforzadas. (De-Acero, 2010)

2.1.5.1.7. Vaciado del concreto

Una vez elaborado el concreto, éste se distribuye en carretillas a lo largo de la mesa y se vacía con la ayuda de una pala.



Figura 16. Vaciado del concreto. (De-Acero, 2010)

2.1.5.1.8. Vibrado del concreto, acabado y colocación de ganchos.

El vibrado tiene un papel fundamental en la resistencia final del concreto, es el proceso por medio del cual se logra un mayor contacto entre los granos de la mezcla, para eliminar en lo posible, el aire atrapado dentro de ésta. El procedimiento adecuado de aplicación es



sumergir verticalmente el vibrador en la masa de concreto y retirarlo lentamente en el momento en que la mezcla produce un flujo de agua y cemento hacia la superficie.

El tamaño de la cabeza del vibrador debe ser lo suficientemente pequeña para poder sumergirse hasta el fondo del molde, es decir que la separación entre los alambres permita libertad de movimiento al vibrador.



Figura 17. Vibrado del concreto de la vigueta pre esforzada. (De-Acero, 2010)

Una vez vibrado, se procede a definir el acabado con una regla y eliminar sobrantes de concreto.



Figura 18. Proceso de acabado de la vigueta pre esforzada. (De-Acero, 2010)



Se colocan 2 ganchos de alambre galvanizado ubicados a los tercios de la longitud de la vigueta. Estos ganchos nos ayudarán a desmoldar las viguetas.



Figura 19. Colocación de los ganchos de alambre. (De-Acero, 2010)

2.1.5.1.9. Curado del concreto

El método de curado más utilizado en elementos prefabricados y especialmente en los pretensados es el curado a vapor. Con la aplicación de este método es posible la producción de elementos pre esforzados en forma económica y rápida al permitir la utilización diaria de los moldes.

El ciclo de curado con vapor es el siguiente: primero después del colado se debe esperar de 3 a 4 horas hasta que el hormigón alcance su fraguado inicial, protegiéndolo con una lona para evitar la deshidratación de la superficie, un segundo paso consiste en elevar la temperatura hasta 33° o 35° C durante una hora. En las siguientes 2 horas se elevará gradualmente hasta llegar a 70° u 80° C.

El proceso de vaporizado durará de 6 a 8 horas manteniendo la temperatura entre 70° y 80° C. Es conveniente que durante este proceso se continúe con un período de enfriamiento gradual cubriendo al elemento para lograr que el enfriamiento sea más lento y uniforme. La duración total del proceso es de aproximadamente 18 horas, lo que permite optimizar el empleo del molde a un uso diario.

Para que el pretensado funcione correctamente es necesario que el hormigón haya alcanzado la resistencia a la compresión f'_c necesaria para resistir los esfuerzos debidos a la transferencia del pre esfuerzo al cortar los cables y liberar las piezas para su



extracción. Generalmente el valor de $f'ci$ se considera del 70 u 80 por ciento del $f'c$ de diseño.

2.1.5.1.10. Destensado del alambre y cortes

Cuando el concreto adquiere el 80% de la resistencia de diseño $f'c$, se procede a la liberación del pre esfuerzo. Primero se realiza una pre-transferencia al aflojar los alambres del extremo móvil de la pista. Posteriormente se cortan los alambres que se encuentran entre los separadores (comenzando del centro de la mesa hacia los extremos).



Figura 20. Destensado del alambre pre esforzado. (De-Acero, 2010)

2.1.5.1.11. Descimbrado de la vigueta

Una vez cortados los alambres, con una barra de acero se genera un brazo de palanca para desmoldar la vigueta a través de los ganchos que fueron colocados en el proceso previo. El peso por metro lineal de la vigueta es de 19 kg aproximadamente.



Figura 21. Descimbrado de las viguetas. (De-Acero, 2010)

2.1.5.1.12. Acarreo y almacenaje

El almacenaje es otra fase importante, por medio de ella un elemento deberá almacenarse soportado únicamente en dos apoyos localizados cerca de los puntos empleados para levantarla (donde se hallan las orejas). En caso de utilizar otros puntos de apoyo para el almacenaje de las piezas, deberá revisarse su comportamiento para dicha condición. Ahora si por cuestiones de diseño se requieren más de dos apoyos, se deberá asegurar que el elemento no quede sin algún soporte debido a asentamientos diferenciales en los apoyos, esta consideración es relevante cuando se está tratando con elementos pre esforzados donde el efecto del pre esfuerzo suele ser muy importante.

La diferencia de temperaturas entre las superficies de un elemento, especialmente en paneles de fachada de grandes dimensiones puede causar pandeo. Este pandeo no puede eliminarse totalmente, pero puede minimizarse manteniendo el panel lo más plano posible. El elemento deberá almacenarse en el patio orientado de tal forma que el Sol no sobrecaliente un solo lado.

Los elementos prefabricados almacenados en estibas deberán de separarse entre ellos por medio de barrotes o durmientes capaces de soportar el peso de los mismos. Los apoyos deberán alinearse verticalmente dejando libres y de fácil acceso a los accesorios para levantarla. No se deben estivar elementos de distintos tamaños y longitudes sin antes revisar que el elemento inferior soporte la carga en el punto en el que se aplique.



Figura 22. Almacenado de las viguetas pre esforzadas. (De-Acero, 2010)

2.1.5.2. Proceso de elaboración de viguetas industriales.

- El primer paso para fabricar las viguetas pre esforzadas industrialmente en una planta automatizada es la limpieza de la pista de trabajo, esto se realiza por medio de una maquina compresora de aire.



Figura 23. Limpieza de la pista de trabajo (Vigeta industrial).

Fuente: Supermix

- Seguidamente se aplica un aditivo desmoldante a la superficie para evitar la adherencia de las viguetas pre esforzadas con el lugar de trabajo, esto también se hace utilizando una máquina que rocía el desmoldante uniformemente durante todo el recorrido.



Figura 24. Aplicación del aditivo desmoldante.

Fuente: Supermix

- Luego se coloca el acero de alta resistencia también llamado cable (debido al diámetro que posee), esto se realiza con ayuda de una máquina que se mueve por los rieles colocados a lo largo de la planta de fabricación y guía los cables en la posición correcta.



Figura 25. Colocación del alambre de alta resistencia.

Fuente: Supermix

- Una vez colocado el cable de acero se procede al pre tensado con ayuda de gatas hidráulicas.



Figura 26. Pre tensado mediante las gatas hidráulicas.

Fuente: Supermix

- Una vez que los cables fueron colocados en posición y tensados, se procede a vaciar el concreto sobre la pista, para esto se necesita una máquina extrusora de concreto, esta máquina está programada para extruir el concreto con la forma final de las viguetas pre esforzadas, este proceso es automático.



Figura 27. Vaciado del concreto sobre la pista, mediante una máquina extrusora.

Fuente: Supermix

- Una vez terminado el proceso de vaciado de concreto se procede a cubrir las viguetas con una fibra de polipropileno para evitar la fuga del vapor de agua con el cual se curan estas viguetas.



Figura 28. Colocación de una fibra de polipropileno para el curado a vapor correspondiente.

Fuente: Supermix

- Luego de tres días se procede a destensar las viguetas y cortar los cables en los extremos para que la fuerza de tensión sea absorbida por las viguetas.



Figura 29. Destensado de las viguetas pre esforzadas.

Fuente: Supermix

- Estas viguetas se fabrican en longitudes variables de 30 y 40 metros, finalmente una maquina se encarga de medir la longitud de la pista y cortar las viguetas a la longitud deseada.



Figura 30. Corte de las viguetas pre esforzadas.

Fuente: Supermix

- Otra máquina pasa a recolectar las viguetas pre esforzadas para luego almacenarlas en lugares adecuados y seguir con la producción de estas.



Figura 31. Traslado de las viguetas pre esforzadas cortadas.

Fuente: Supermix

- Finalmente, estas viguetas pasan controles por controles de deflexión lo que garantiza su funcionalidad.



Figura 32. Almacenamiento de las viguetas pre esforzadas.

Fuente: Supermix

2.2. El Concreto

Es una mezcla adecuadamente dosificada de cemento, agua, y agregados fino y grueso y adicionalmente puede tener en su composición aditivos, adiciones y fibra para obtener ciertas propiedades prefijadas, especialmente la resistencia.

El cemento y el agua reaccionan químicamente uniendo las partículas de los agregados para así constituir un material heterogéneo. El concreto posteriormente adquiere una consistencia rígida con propiedades aislantes y resistentes lo que lo hace un material ideal para la construcción.

$$\boxed{\text{CONCRETO} = \text{CEMENTO PORTLAND} + \text{AGREGADOS} + \text{AIRE} + \text{AGUA}}$$

Ventajas:

- Facilidad para colocarse dentro de los encofrados mientras tenga una consistencia plástica.
- Elevada resistencia a la compresión (columnas y arcos).
- Elevada resistencia al fuego y a la penetración del agua.

Desventajas:

- Control de calidad no es tan bueno (no hay responsable absoluto de su producción).



- Escasa resistencia a la tracción (Vigas).
- En elementos sometidos a tracción se utiliza el acero y de esta combinación resulta el Concreto Armado, y que esta combinación permite la masiva utilización del concreto armado en la construcción de edificios, puentes, pavimentos, presas, tanques, pilotes, etc.

2.2.1. Componentes del concreto

2.2.1.1. El cemento

El cemento es el componente más importante y activo del concreto, el cual cuando se mezcla con agua ya sea solo o en combinación con la arena, piedra u otros materiales similares, tiene la propiedad de reaccionar lentamente con el agua hasta forma una masa endurecida. Esencialmente es el Clinker finamente molido, producido por la acción a elevadas temperaturas (1400 – 1450 °C), de mezcla que contiene cal, alúmina, fierro y sílice en proporciones determinadas. Los principales materiales con que se fabrica el cemento son: piedra caliza y arcilla.

Tabla 7. Compuestos químicos que conforman el cemento

| DESIGNACIÓN | FÓRMULA | ABREVIATURA | PORCENTAJE |
|------------------------------|-------------------------------------|-------------|------------|
| Silicato tricálcico | 3CaO.SiO ₂ | C3S | 30% a 50% |
| Silicato dicálcico | 2CaO.SiO ₂ | C2S | 15% a 30% |
| Aluminato tricálcico | 3CaO.Al ₂ O ₃ | C3A | 4% a 12% |
| Ferro Aluminato tetracalcico | | C4AF | 8% a 13% |
| Cal Libre | CaO | | |
| Magnesia Libre (Periclasa) | MgO | | |

Fuente: Curso básico de tecnología de concreto para ingenieros civiles-Ing. Ana Torre C (Ana, 2007)

El Cemento Portland Yura Tipo I.

Es un cemento portland fabricado por la norma ASTM-C150 y posee las siguientes especificaciones:



Tabla 8. Especificaciones Químicas Del Cemento Portland Tipo I

| REQUISITOS QUÍMICOS | CEMENTO PORTLAND | NORMA ASTM |
|-------------------------|------------------|------------|
| | YURA TIPO I | C-150 |
| Mg O (%) | 2.55 | 6.00 Máx. |
| SO ₃ (%) | 2.10 | 3.00 Máx. |
| Perdida de Agnición (%) | 0.6 | 3.00 Máx. |

Fuente: *Manual de usos y aplicaciones de cemento Portland YURA tipo I pag.10*
(YURA S.)

Tabla 9. Especificaciones físicas del Cemento Portland Yura Tipo I

| REQUISITOS FÍSICOS | CEMENTO PORTLAND YURA TIPO I | NORMA ASTM C-150 |
|--|---------------------------------|------------------|
| Peso Específico | 3.11 (*) | |
| S. Específica Blaine (cm ² /gr) | 3.15 | 2.6 Min. |
| Expansión en Autoclave (%) | 0.07 | 0.80 Max. |
| Fraguado Inicial Vicat | 140 min | más de 45' |
| Fraguado final Vicat | 160 min | menos de 420' |
| f'c a 3 Días (kg/cm ²) | 240 | 122.36 |
| f'c a 7 Días (kg/cm ²) | 330 | 193.75 |
| f'c a 28 Días (kg/cm ²) | 430 | - |

(*) Diseño de Mezclas - Ing. (Riva López)

Tabla 10. Características químicas de los cementos peruanos (Comparación entre el Portland Tipo I y el Puzolanico Tipo IP)

| ELEMENTO | PORTLAND TIPO I | PUZOLANICO TIPO IP |
|--------------------------------|-----------------|--------------------|
| CaO | 65.90 | 46.3 |
| SiO | 22.66 | 43.51 |
| Al ₂ O ₃ | 4.15 | 3.36 |
| Fe ₂ O ₃ | 2.41 | 1.98 |
| SO ₃ | 1.66 | 1.42 |
| MgO | 1.24 | 1.3 |
| Cal Libre | | |



| ELEMENTO | PORTLAND TIPO I | PUZOLANICO TIPO IP |
|-------------|-----------------|--------------------|
| P. Ignición | 0.96 | 1.6 |
| R. Solubles | 0.48 | 26.7 |
| C3S | 60.00 | |
| C2S | 19.70 | |
| C2A | 6.92 | |
| C4AF | 7.33 | |

Fuente: *Tópicos de Tecnología del Concreto - Ing. Enrique Pasquel C.* pág.47

(Enrique)

Tabla 11. Características físicas de los cementos peruanos

| ELEMENTO | PORTLAND TIPO I | PUZOLANICO TIPO IP |
|-------------------------------|-----------------|--------------------|
| Peso Específico (gr/cm3) | 3.11 | 2.86 |
| Fineza malla 100 (%) | | |
| Fineza malla 200 (%) | | |
| S. Específica Blaine (cm2/gr) | 3,597 | 4,086 |
| Contenido de Aire (%) | | |
| Expansión en Autoclave (%) | 0.2 | 0.11 |
| Fraguado Inicial Vicat | 2 hr. | 2 hr. |
| Fraguado final Vicat | 4 hr. | 4 hr 10' |
| f'c a 3 días (kg/cm2) | 242 | 140 |
| f'c a 7 días (kg/cm2) | 335 | 222 |
| f'c a 28 días (kg/cm2) | 388 | 316 |

Fuente: *Tópicos de Tecnología del Concreto - Ing. Enrique Pasquel C.* pág.47

(Enrique)

Cabe resaltar que no existe información periódica publicada por los fabricantes sobre aspectos básicos, tales como la variación del desarrollo de la resistencia en el tiempo, variación de la hidratación en función de las condiciones ambientales, características de las puzolanas que emplean en los cementos mezclados, estadísticas de los controles que realizan, etc. información que sería muy útil para los usuarios e investigadores, evitando muchas situaciones en que se espera un comportamiento por extrapolación con



información foránea o con información local incompleta obteniéndose datos no confiables.

2.2.1.2. El Agua

Es el elemento fundamental en la preparación del concreto, estando relacionado con la resistencia, trabajabilidad y propiedades del concreto endurecido. El agua presente en la mezcla de concreto reacciona químicamente con el material cementante para lograr:

A. LA FORMACIÓN DEL GEL

El gel desempeña el papel más importante en el comportamiento del concreto especialmente en sus resistencias mecánicas y en su módulo de elasticidad. Los dos silicatos de calcio, los cuales constituyen cerca del 75% del peso del cemento Portland, reaccionan con el agua para formar dos nuevos compuestos: el hidróxido de calcio y el hidrato de silicato de calcio. Este último es el componente cementante más importante en el concreto, ya que las propiedades ingenieriles del concreto, fraguado y endurecimiento, resistencia y estabilidad dimensional principalmente dependen de él.

B. EN ESTADO FRESCO: Facilitan una adecuada manipulación y colocación de la misma.

C. EN ESTADO ENDURECIDO: La convierten en un producto de las propiedades y características deseadas.

D. CURADO DEL CONCRETO: El aumento de resistencia continuará con la edad mientras se encuentre cemento sin hidratar.

El agua empleada en la preparación y curado del concreto deberá cumplir con los requisitos de la norma NTP 334.088, y ser de preferencia potable, o las que por experiencia se conozca que pueden ser utilizadas en la preparación del concreto. Adicionalmente, el agua empleada no podrá contener sustancias que puedan producir efectos desfavorables sobre el fraguado, resistencia, la durabilidad o apariencia del concreto, o sobre los elementos metálicos embebidos en este.

2.2.1.3. Los Agregados

Constituye alrededor del 75%. Aproximadamente un 80% del peso del concreto está compuesto por partículas de origen pétreos, de diferentes tamaños. La calidad de los agregados depende de las condiciones geológicas de la roca madre, de los procesos extractivos y de las empresas productoras. El agregado dentro del concreto cumple principalmente las siguientes funciones:



- Como esqueleto o relleno adecuado para la pasta (cemento y agua), reduciendo el contenido de pasta en el metro cúbico.
- Proporciona una masa de partículas capaz de resistir las acciones mecánicas de desgaste o de intemperismo, que puedan actuar sobre el concreto.
- Reducir los cambios de volumen resultantes de los procesos de fraguado y endurecimiento, de humedecimiento y secado o de calentamiento de la pasta.

2.2.1.3.1. Agregado fino:

- Es el agregado proveniente de la desagregación natural o artificial, que pasa el tamiz normalizado 9,5 mm (3/8") y que cumplen con los límites establecidos en la norma NTP 400.037 o ASTM C – 33.
- El agregado fino puede consistir de arena natural o manufacturada o una combinación de ambas. Sus partículas deberán ser limpias, de perfil preferentemente angular, duras, compactas y resistentes.
- Según la Norma NTP 400.037: Para la granulometría se utilizan los tamices Nº 4, 8, 16, 30, 50, 100 de la serie Tyler.
- La diferencia entre el contenido que pasa una malla y el retenido en la siguiente no debe ser mayor que el 45 % del total de la muestra.
- El módulo de fineza se mantendrá dentro del límite de más o menos 0.2 % del valor asumido para la selección de las proporciones del concreto; siendo según la norma ASTM no menor de 2.3 ni mayor de 3.1.
 - ✓ Arenas comprendidas entre los módulos 2.2 y 2.8 producen concretos de buena trabajabilidad y reducida segregación.
 - ✓ Arenas comprendidas entre los módulos 2.8 y 3.1 son más favorables para concretos de alta resistencia.
 - ✓ Para revestimientos de canales o pisos de concreto, se recomienda que la arena tenga un contenido de finos superior al 15% que pasa la malla Nº 50.

2.2.1.3.2. Agregado grueso:

- Es el agregado retenido en el tamiz normalizado 4,75 mm (Nº 4) proveniente de la desagregación natural o artificial de la roca, y que cumple con los límites establecidos en la Norma NTP 400.037 o Norma ASTM C - 33.
 - ✓ En ningún caso el Tamaño Máximo del agregado grueso deberá ser mayor de:
 - ✓ 1/5 de la menor dimensión de las caras del encofrado.
 - ✓ 1/3 de la altura de la losa.



- ✓ $\frac{3}{4}$ del espacio libre entre las barras o alambres individuales de refuerzo. Ello para poder evitar las cangrejeras.
- Se considera que cuando se incrementa el tamaño máximo del agregado, se reducen los requerimientos del agua de mezcla, incrementándose la resistencia del concreto, en general este principio es válido con agregados hasta $1\frac{1}{2}$ ", en tamaños mayores solo es aplicable a concretos con bajo contenido de cemento.
- Las piedras partidas o chancadas pesa entre 1450 a 1500 kg/m³, y se denominan así, al agregado grueso obtenido por trituración artificial de rocas y gravas.

2.2.1.3.3. Módulo de fineza

Es un índice aproximado del tamaño medio de los agregados, cuando este índice es bajo quiere decir que el agregado es fino. El módulo de fineza no distingue la granulometría, pero en caso de agregados que estén dentro de los porcentajes especificados en la norma granulométrica, sirve para controlar la uniformidad de los mismos. Se calcula sumando los porcentajes acumulados retenidos en las mallas 3", $1\frac{1}{2}$ ", $\frac{3}{4}$ ", $\frac{3}{8}$ " Nº 4, 8, 16, 30, 50, 100 y dividiéndolo entre 100.

2.2.1.3.4. Tamaño máximo:

La Norma NTP 400.037 define al “Tamaño Máximo” como a aquel que “corresponde al menor tamiz por el que pasa toda la muestra del agregado grueso”.

2.2.1.3.5. Tamaño máximo nominal:

La Norma NTP 400.037 define al “Tamaño Máximo Nominal” como a aquel que “corresponde al menor tamiz de la serie utilizada que produce el primer retenido”.

2.2.2. Propiedades del concreto

Las características del concreto han de ser función del fin para la cual está destinado. Por ello la selección de las proporciones de la unidad cubica de concreto debe permitir obtener un concreto con la facilidad de colocación, densidad, resistencia, durabilidad u otras propiedades que se consideran necesarias para el caso particular para el cual la mezcla está siendo diseñada.

2.2.2.1. La trabajabilidad

Se entiende por trabajabilidad a aquella propiedad del concreto al estado no endurecido la cual determina su capacidad para ser manipulado, transportado, colocado y consolidado adecuadamente, con un máximo de trabajo y un máximo de homogeneidad; así como para ser acabado sin que se presente segregación.



La trabajabilidad tiene relación con el contenido de cemento en la mezcla; con las características, granulometría, relación de los agregados fino – grueso y proporciones del agregado en la mezcla; con la cantidad de agua y aire en la mezcla con la presencia de aditivos, y con las condiciones ambientales.

Algunas de las consideraciones sobre la trabajabilidad que deben ser tomadas en consideración al diseñar la mezcla de concreto son las siguientes:

1. La fineza del cemento, determinada por su superficie específica. Los cementos de alta fineza la mejoran notablemente, pero pueden producir agrietamiento superficial en el secado. Se considera que la fineza de orden de 3300 cm²/gr son las más recomendables.
2. Tanto el contenido de cemento cuanto el volumen y granulometría de los agregados, así como las características físicas de estos son factores que regulan la cantidad de agua requerida para producir un concreto trabajable. Es siempre recomendable trabajar con el mínimo contenido de agua, a fin de conseguir trabajabilidad y resistencia adecuadas sin desmedro de durabilidad.
3. La presencia, en porcentajes adecuados de las partículas más finas del agregado tienden a mejorar la trabajabilidad del concreto.
4. La ausencia de las partículas finas en el agregado puede ser compensada por el empleo del cemento tipo I o IP, o por adición de arenas muy finas, siempre que se tenga en consideración la posible influencia de estas adiciones sobre la demanda de agua y las propiedades del concreto.
5. Las partículas de agregados alargados y chatas tienen efecto negativo sobre la trabajabilidad y obligan a diseñar mezclas más ricas en agregado fino y por consiguiente a emplear mayores cantidades de cemento y agua.
6. La incorporación de aire a la mezcla mejora la trabajabilidad aun en aquellos casos en que el agregado fino no posee adecuado porcentaje en las mallas Nº 50 y Nº 100.

2.2.2.2. La consistencia

La consistencia del concreto es una propiedad que define la humedad de la mezcla por el grado de fluidez de la misma; entiéndese con ello que cuanto más húmeda es la mezcla mayor será la facilidad con la que el concreto fluirá durante su colocación. La consistencia está relacionada pero no es sinónimo de trabajabilidad. Así, por ejemplo, una mezcla muy trabajable para pavimentos puede ser muy consistente, en tanto que una mezcla poco trabajable en estructuras con alta concentración de acero puede ser de consistencia



plástica Las normas alemanas clasifican al concreto, de acuerdo a su consistencia, en tres grupos:

- Concretos consistentes o secos.
- Concretos plásticos.
- Concretos fluidos.

Los norteamericanos clasifican al concreto por el asentamiento de la mezcla fresca. El método de determinación es conocido como método del cono de asentamiento, método de cono de Abram, método de Slump y define la consistencia de la mezcla por el asentamiento, medido en pulgadas o milímetros, de una masa de concreto que previamente ha sido colocada y compactada en un molde metálico de dimensiones definidas y sección tronco cónica. Por consiguiente, se puede definir al asentamiento como la medida de la diferencia de altura entre el molde metálico estándar y la masa de concreto después que ha sido retirado el molde que la recubría. En la actualidad se acepta una correlación entre la norma alemana y los criterios norteamericanos considerándose que:

- A las consistencias secas corresponden asentamientos de 1" - 2".
- A las consistencias plásticas corresponden asentamientos de 3" - 4".
- A las consistencias fluidas corresponden asentamientos de 6" - 7".

Al controlar el asentamiento en la obra se controla directamente la uniformidad en la consistencia y trabajabilidad necesaria para una adecuada colocación; e indirectamente el volumen unitario de agua, la relación agua – cemento y las modificaciones en la humedad del agregado. Por otra parte, si el contenido de los agregados es uniforme y se adiciona volúmenes constantes de agua a la mezcla, las variaciones en el asentamiento son un índice de modificaciones en la dosificación de la mezcla.

2.2.2.3. La resistencia

Es definida como el máximo esfuerzo que puede ser soportado con dicho material sin romperse. Dado que el concreto está destinado principalmente a tomar esfuerzos de compresión, es la medida de su resistencia a dichos esfuerzos la que se utiliza como índice de su calidad. La resistencia es una de las más importantes propiedades del concreto endurecido, siéndola que generalmente se emplea para la aceptación y rechazo del mismo. Pero el ingeniero diseñador de la mezcla debe recordar que otras propiedades, tales como la durabilidad, permeabilidad, o resistencia al desgaste pueden ser tantos o más importantes que la resistencia, dependiendo de las características y ubicación de la obra.



De acuerdo a la teoría de Abrams, para un conjunto dado de materiales y condiciones, la resistencia del concreto está principalmente determinada por la cantidad neta de agua empleada por unidad de cemento. Esta agua neta excluye aquella absorbida por los agregados. Así, de acuerdo a la escuela de Abrams, el factor que influye en forma determinante sobre la resistencia del concreto es la relación a/c de la mezcla, siendo mayor la resistencia conforme dicha relación se hace menor. Posteriormente el norteamericano Gilkey, apoyándose en sus propias observaciones y en el trabajo de Walker, Bloem y Gaynor, ha demostrado que la resistencia del concreto es función de cuatro factores:

- ✓ Relación agua – cemento.
- ✓ Relación cemento – agregados.
- ✓ Granulometría, perfil, textura superficial, resistencia y dureza del agregado.
- ✓ Tamaño máximo del agregado.

2.2.2.4. La impermeabilidad

Es una de las propiedades del concreto que se puede mejorar, reduciendo la cantidad de agua en la mezcla. El exceso de agua deja vacíos y las cavidades después de la evaporación permiten que el agua pueda penetrar o atravesar por el concreto. La inclusión de aire (burbujas diminutas) así como un curado adecuado por tiempo prolongado, suele aumentar la impermeabilidad del concreto. La permeabilidad depende fundamentalmente de la compactación del concreto, del contenido de cemento en la mezcla: a más cemento menos permeabilidad; de la buena hidratación de la pasta de cemento (necesidad de un curado de buena calidad y extensión) y de la utilización de una puzolana activa. Naturalmente que la permeabilidad del agregado tiene mucha importancia en la del concreto, ya que los agregados ocupan hasta 75 % del volumen del concreto.

2.2.2.5. La durabilidad

- El concreto debe ser capaz de endurecer y mantener sus propiedades en el tiempo aun en aquellas condiciones de exposición que normalmente podrían disminuir o hacerle perder su capacidad estructural. Por lo tanto, se define como concreto durable a aquel que puede resistir, en grado satisfactorio, los efectos de las condiciones de servicio a las cuales él está sometido.
- Entre los agentes externos o internos capaces de atentar contra la durabilidad del concreto se encuentran los procesos de congelación y deshielo; los de humedecimiento



y secado; los de calentamiento y enfriamiento; la acción de agentes químicos; especialmente cloruros y sulfatos; y la de aditivos descongelantes.

- El empleo de la relación agua – cemento bajas deberá prolongar la vida del concreto al reducir el volumen de poros capilares, incrementar la relación gel – espacio y reducir la permeabilidad y absorción; disminuyendo por todas las razones expuestas la posibilidad de penetración del agua o líquidos agresivos
- La resistencia del concreto a la acción de heladas depende de la naturaleza de los agregados y de su granulometría; del volumen de agua de la mezcla de la estructura capilar del concreto, y de su resistencia a la compresión, igualmente cuanto más impermeable es un concreto mayor es su resistencia a la penetración de las aguas y por consiguiente mayor su resistencia a heladas ello debido a que:
 - Sobre su estructura actúa el agua libre que se encuentra en el interior de los poros, la cual puede haberse introducido por acción capilar o por presión y está sujeta a procesos de congelación y deshielo.
 - El grado de presión de esta agua congelada depende del volumen de la misma que hayan contenido los poros en el momento de ocurrir la helada.
 - La incorporación de aire a la mezcla incrementa la resistencia del concreto a la acción desintegrante de heladas y deshielo. El aire incorporado, al ser dispersado a través de la masa de concreto en forma de minúsculas burbujas, proporciona espacios en los cuales las fuerzas mecánicas que causan la desintegración son disipadas.
 - La incorporación de aire igualmente incrementa la durabilidad por reducción de la capilaridad y disminución del volumen y sección de los canales de agua o poros capilares del concreto endurecido, por disminución de exudación y segregación del concreto fresco.
 - El concreto puede deteriorarse por contacto con diferentes agentes químicos activos o por sustancias que en sí mismas no son nocivas, pero que pueden reaccionar con alguno de los elementos integrantes del concreto. Entre las sustancias consideradas como peligrosas se encuentran:
 - ✓ Los ácidos orgánicos.
 - ✓ Las sales inorgánicas.
 - ✓ Los cloruros.
 - ✓ Los sulfatos de sodio, magnesio o calcio.



- ✓ Las aguas que contienen muy poca o ninguna sal en disolución, es decir que están casi químicamente puras.
- ✓ El nitrato de amonio.
- ✓ Las grasas y aceites minerales.



CAPÍTULO III

3. METODOLOGÍA DE LA INVESTIGACIÓN

3.1. Tipo de investigación

La presente investigación es del tipo **PROYECTIVA** (o proyecto factible: Este tipo de investigación, consiste en la elaboración de una propuesta, o un modelo, como solución a un problema o necesidad de tipo práctico, ya sea de un grupo social, o de una región geográfica, en un área particular del conocimiento, a partir de un diagnóstico preciso de las necesidades del momento, los procesos explicativos o generadores involucrados y de las tendencias futuras, es decir, con base en los resultados de un proceso investigativo.) y **EXPERIMENTAL**.

Esta tesis se inició a partir del interés de aumentar el uso de las viguetas pre esforzadas en la construcción en la ciudad de Cusco y así pretender innovar la tecnología de construcción que se utiliza comúnmente. Este estudio se basa en determinar la factibilidad y la elaboración de viguetas pre esforzadas con agregados de la zona de Cusco. Todo esto con la finalidad de comprobar si las viguetas que se elaboren cumplan con las características y las solicitudes para las cuales se diseñaron y determinar también si se cuenta con un mercado el cual consuma y utilice este producto en el futuro.



3.2. Nivel de investigación

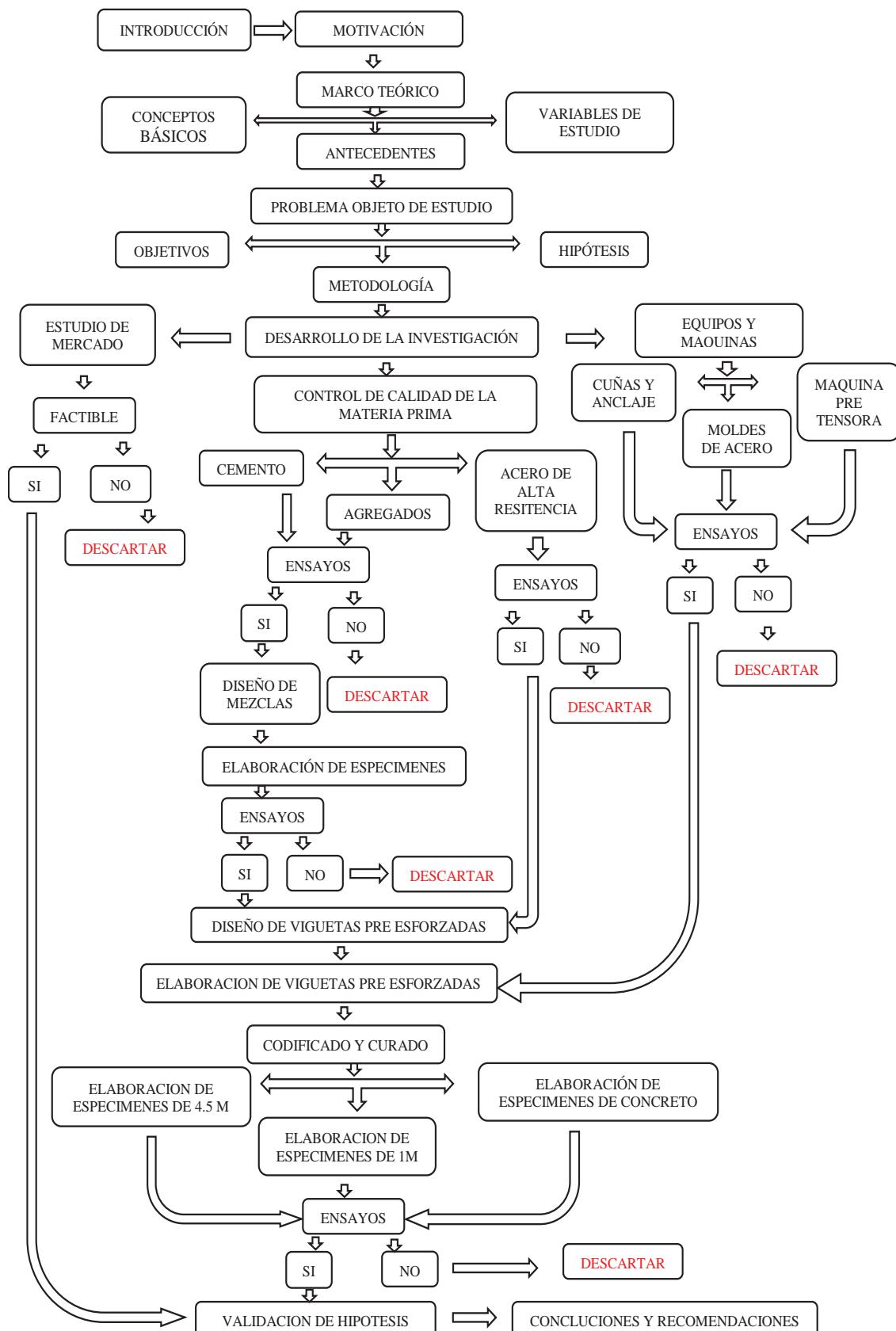
Sánchez Carlessi H. y Reyes Meza C. (2006) manifiestan que siguiendo a Sellitz, Jahoda y otros (1965) podemos identificar tres niveles o esquemas básicos de investigación (según la profundidad y objetivo). Estos son:



Este trabajo de tesis abarca hasta el segundo nivel de investigación (INVESTIGACIÓN DESCRIPTIVA), se abarca el tema de las viguetas pre esforzadas en lo que concierne al diseño, fabricación y su uso, así también se realiza un estudio de mercado para este producto, todo esto con el fin de determinar la factibilidad para su elaboración en la ciudad del Cusco utilizando agregados de dicha zona. Finalmente se describen y analizan los factores que influyen en el estudio de factibilidad para este producto.



3.3. Diseño de investigación





3.4. Población y muestra

3.4.1. Población

En el presente trabajo de investigación se tomará como población a:

- Para la etapa de estudio de canteras y agregados de la zona de Cusco se tiene como población a todas las canteras en las cuales se producen agregados (canto rodado y piedra chancada) en el departamento de Cusco.
- También se tomará como población objeto de estudio a las viguetas pre esforzadas comercializadas en la ciudad de Cusco.
- Se considera como población de estudio a los diferentes tipos de acero de alta resistencia que se venden en el mercado (baja relajación, alta relajación, diferentes diámetros de acero, etc.).
- Para el estudio de mercado y las encuestas se tomará como población a todos los ingenieros civiles cusqueños colegiados y habilitados, también a arquitectos y demás profesionales dedicados a la construcción.

3.4.2. Muestra

- En el estudio de canteras y agregados se tomará como muestra a dos canteras no muy conocidas pero que son utilizadas en la fabricación de concreto en la ciudad de Cusco. Estas canteras son la de Vilcabamba de la cual obtendremos agregados finos y la cantera de Huandar de la cual obtendremos agregados gruesos. De estas canteras se tomará una muestra representativa, la cual nos ayudará a determinar sus propiedades físico-mecánicas.
- También se tomará como población objeto de estudio y diseño a las viguetas pre esforzadas de 4 metros ya que esta se considera como una longitud promedio entre apoyos en la mayoría de construcciones de viviendas unifamiliares.
- Para las pruebas a flexión, se tomará como muestra representativa viguetas de 1m de longitud, esto básicamente limitado por la maquina universal donde serán ensayadas las muestras.
- En lo concerniente al acero de alta resistencia, se considera como muestra a especímenes de 1m de longitud del acero de alta resistencia que se utilizará para la elaboración de viguetas pre esforzadas, esta longitud también es determinada por la maquina universal donde serán ensayadas.



- Para el estudio de mercado y las encuestas se tomará como muestra homogénea a los ingenieros civiles cusqueños colegiados y habilitados dedicados a la construcción en la etapa de diseño y elaboración de proyectos de viviendas.
- Durante el proceso de elaboración de viguetas pre esforzadas y diseño de concreto se tomarán briquetas de concreto para controlar su calidad.
- Finalmente, las muestras representativas serán viguetas pre esforzadas de 4.5m las cuales representan el caso real de diseño.

3.5. Técnicas e instrumentos para la recolección de datos

A continuación, detallamos una breve descripción para cada uno de los ensayos que se tuvieron que realizar.

3.5.1. Extracción y preparación de muestras

REFERENCIAS NORMATIVAS: NTP 400.010 – MTC E 201 – 2000 – ASTM D 75

El muestreo y el ensayo son importantes, por lo tanto, el operador deberá tener siempre la precaución de obtener muestras que denoten la naturaleza y condiciones del material al cual representan.

OBJETIVO: La presente Norma Técnica Peruana establece los procedimientos del muestreo del agregado grueso, fino y global, para los propósitos siguientes:

- Investigación preliminar de la fuente potencial de abastecimiento.
- Control en la fuente de abastecimiento.
- Control de las operaciones en el sitio de su utilización.
- Aceptación o rechazo de los materiales.

PROCEDIMIENTO:

- Se Muestreo de acuerdo a la norma NTP 400.010 y para los cuales se tomaron todas las medidas los cuales nos lleven a realizar buenos muestreos.
- Muestreo de flujos de corriente de agregados (Descarga de depósitos o cintas): De la producción seleccionar muestras al azar, tal como se indica en la práctica normalizada ASTM D 3665.
- Obtener por lo menos 3 incrementos iguales, seleccionados al azar de la unidad que está siendo muestreada y combinarlos para formar una muestra cuya masa iguale o exceda lo mínimo recomendado en el apartado 4.4.2. Tomar cada incremento a través de toda la sección del elemento de descarga. Es necesario contar con un dispositivo especial para ser utilizado en cada planta en particular. Este dispositivo



consistirá en un recogedor de medida suficiente para interceptar la sección transversal del chorro de descarga para retener la cantidad requerida de material sin derramar. Un conjunto de rieles podrá ser necesarios para servir como guía al recogedor mientras pasa por el chorro de descarga hasta donde sea posible, mantener el depósito continuamente lleno o casi lleno para reducir la segregación.

Para nuestro muestreo lo realizamos de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 12. Extracción y preparación de muestras

| Tamaño máximo nominal del agregado ^A | Masa mínima aproximada para la muestra de campo kg ^B |
|---|---|
| Agregado fino | |
| 2,36 mm | 10 |
| 4,76 mm | 10 |
| Agregado grueso | |
| 9,5 mm | 10 |
| 12,5 mm | 15 |
| 19,0 mm | 25 |
| 25,0 mm | 50 |
| 37,5 mm | 75 |
| 50,00 mm | 100 |
| 63,00 mm | 125 |
| 75,00 mm | 150 |
| 90,00 mm | 175 |

^A Para agregado procesado, el tamaño máximo nominal es la menor malla donde se produce el primer retenido.

^B Para agregado global (por ejemplo base o sub-base) la masa mínima requerida será la mínima del agregado grueso más 10 kg .

Fuente: Norma Técnica Peruana NTP 400.010 Pág. 5

3.5.2. Cantidad de material fino que pasa por el TAMIZ N° 200

Referencias normativas: NTP 400.018 – MTC E 202 – 2000 – ASTM C 117

OBJETIVO: Describe el procedimiento para determinar, por lavado, la cantidad de material fino que pasa el tamiz de 75 mm (No. 200) en un agregado.

Durante el ensayo se separan de la superficie del agregado, por lavado, las partículas que pasan el tamiz de 75 mm (No. 200), tales como: arcillas, agregados muy finos, y materiales solubles en el agua.

APARATOS

- Balanza, con sensibilidad de por lo menos 0.1% del peso de la muestra que se va a ensayar.



- Dos tamices, siendo el menor el No. 200 y el otro el No. 16.
- Recipientes. Una vasija de tamaño suficiente para mantener la muestra cubierta con agua y que permita una agitación vigorosa sin pérdida de ninguna partícula o del agua.
- Estufa, de tamaño adecuado y capaz de mantener una temperatura constante y uniforme de $110^\circ \pm 5^\circ \text{C}$.

MUESTRA DE ENSAYO

- Tómese la muestra de agregado de acuerdo con los procedimientos descritos en la norma NTP 400.010.
- Redúzcase la muestra por cuarteo, hasta un tamaño suficiente, de acuerdo con el tamaño máximo del material, si va a ser sometida a tamizado en seco. En caso contrario, la muestra no será menor que la indicada en la siguiente tabla:

Tabla 13. Cantidad de material fino que pasa por el tamiz N°200

| Tamaño nominal máximo de tamices | | Peso mínimo Aprox. de la muestra en gramos (g) |
|----------------------------------|------------------|--|
| 4,75 mm | (N° 4) ó menos | 300 |
| 9,5 mm | (3/8") | 1000 |
| 19,0 mm | (3/4") | 2500 |
| 37,5 mm | (1 1/2") o mayor | 5000 |

Fuente: Manual de Ensayo de Materiales Pág. 2

PROCEDIMIENTO

- Séquese la muestra de ensayo, hasta peso constante, a una temperatura que no exceda los $110^\circ \pm 5^\circ \text{C}$ y pésese con una precisión de 0.1%.
- □ Después de secada y pesada, colóquese la muestra de ensayo en el recipiente y agréguese suficiente cantidad de agua para cubrirla. Agítense vigorosamente el contenido del recipiente y de inmediato viértase sobre el juego de tamices armado. Se considera satisfactorio el uso de una cuchara grande para agitar la muestra en el agua.
- Agítense con suficiente vigor para lograr la separación total de todas las partículas más finas que el tamiz N° 200 y provocar la suspensión del material fino, de manera que pueda ser removido por decantación del agua de lavado. Es conveniente tener el



cuidado necesario para no arrastrar las partículas más gruesas. Repítase esta operación hasta que el agua de lavado salga completamente limpia.

- Devuélvase todo el material retenido en el juego de tamices a la muestra lavada.
- Séquese el agregado lavado hasta obtener un peso constante, a una temperatura que no exceda de $110^{\circ} \pm 5^{\circ}\text{C}$ y pésese con una aproximación de 0.1% del peso de la muestra.

3.5.3. Peso unitario y vacío de los agregados

Referencias normativas: NTP 400.017 – MTC E 203 – 2000 – ASTM C 29

OBJETO Establecer el método para determinar el peso unitario suelto o compactado y el porcentaje de los vacíos de los agregados, ya sean finos, gruesos o una mezcla de ambos

APARATOS

- Balanza. Debe medir con una exactitud de 0.1% con respecto al material usado.
- Varilla compactadora, de acero, cilíndrica, de 16 mm (5/8") de diámetro, con una longitud aproximada de 600 mm (24"). Un extremo debe ser semiesférico y de 8 mm de radio.
- Recipientes de medida, metálicos, cilíndricos, preferiblemente provistos de agarraderas.

PROCEDIMIENTO

Para agregados de tamaño nominal menor o igual que 39 mm (11/2").

- El agregado debe colocarse en el recipiente, en tres capas de igual volumen aproximadamente, hasta colmarlo.
- Cada una de las capas se empareja con la mano y se apisona con 25 golpes de varilla, distribuidos uniformemente en cada capa, utilizando el extremo semiesférico de la varilla.
- Al apisonar la primera capa, debe evitarse que la varilla golpee el fondo del recipiente. Al apisonar las capas superiores, se aplica la fuerza necesaria para que la varilla solamente atraviese la respectiva capa.
- Una vez colmado el recipiente, se enrasa la superficie con la varilla, usándola como regla, y se determina el peso del recipiente lleno, en kg.



3.5.4. Análisis granulométrico de agregados gruesos y finos

Referencias normativas: NTP 400.012 – MTC E 204 – 2000 – ASTM C 136

OBJETIVO Determinar, cuantitativamente, los tamaños de las partículas de agregados gruesos y finos de un material, por medio de tamices de abertura cuadrada.

APARATOS

- Balanza, con sensibilidad de por lo menos 0.1% del peso de la muestra que va a ser ensayada.
- Tamices. Tamices seleccionados de acuerdo con las especificaciones del material que va a ser ensayado.
- Estufa de tamaño adecuado, capaz de mantener una temperatura uniforme de 110° ± 5 °C.

MUESTRA Las muestras para el ensayo se obtendrán por medio de cuarteo, manual o mecánico. El agregado debe estar completamente mezclado y tener la suficiente humedad para evitar la segregación y la pérdida de finos.

- Las muestras de agregado fino para el análisis granulométrico, después de secadas, deberán tener mínimo 300 gr.
- Las muestras de agregado grueso para el análisis granulométrico, después de secadas, deberán tener aproximadamente los siguientes pesos de la tabla:

Tabla 14. Pesos mínimos de la muestra según el tamaño de agregado

| Máximo tamaño nominal con aberturas cuadradas | | Peso mínimo de la muestra de ensayo |
|---|---------|-------------------------------------|
| mm | (Pulg) | kg |
| 9.5 | (3/8) | 1 |
| 12.5 | (1/2) | 2 |
| 19.0 | (3/4) | 5 |
| 25.0 | (1) | 10 |
| 37.5 | (1 1/2) | 15 |
| 50.0 | (2) | 20 |
| 63.0 | (2 1/2) | 35 |
| 75.0 | (3) | 60 |
| 90.0 | (3 1/2) | 100 |
| 100.0 | (4) | 150 |
| 112.0 | (4 1/2) | 200 |
| 125.0 | (5) | 300 |
| 150.0 | (6) | 500 |

Fuente: Manual de Ensayo de Materiales Pág. 2



PROCEDIMIENTO

- Selecciónese un grupo de tamices de tamaños adecuados para cumplir con las especificaciones del material que se va a ensayar. Colóquense los tamices en orden decreciente, por tamaño de abertura. Efectúese la operación de tamizado a mano o por medio de un tamizador mecánico, durante un período adecuado.
- Limítese la cantidad de material en un tamiz dado, de tal forma que todas las partículas tengan la oportunidad de alcanzar las aberturas del tamiz varias veces durante la operación del tamizado.
- En el caso de mezclas de agregados gruesos y finos, la porción de muestra más fina que el tamiz de 4.75 mm (No. 4) puede distribuirse entre dos o más grupos de tamices para prevenir sobrecarga de los tamices individuales.
- Para partículas mayores de 75 mm (3"), el tamizado debe realizarse a mano, determinando la abertura del tamiz más pequeño por el que pasa la partícula.
- El peso total del material después del tamizado, debe ser comparado con el peso original de la muestra que se ensayó. Si la cantidad difiere en más del 0.3%, basado en el peso de la muestra original seca, el resultado no debe ser aceptado.

3.5.5. Gravedad específica y absorción de agregados finos

Referencias normativas: MTC E 205 – 2000 – ASTM C 128

OBJETIVO

Describe el procedimiento que debe seguirse para la determinación del peso específico aparente y real a 23/23 °C, así como la absorción después de 24 horas de sumergidos en agua, de los agregados con tamaño inferior al tamiz No. 4.

DEFINICIONES

- Volúmenes aparentes y nominales. En un sólido permeable, si se incluye en su volumen la parte de vacíos accesibles al agua en las condiciones que se establezcan, se define el volumen denominado "aparente"; si se excluye este volumen de vacíos, al volumen resultante se denomina "nominal".
- Peso específico aparente y nominal. En estos materiales, se define el peso específico aparente como la relación entre el peso al aire del sólido y el peso de agua correspondiente a su volumen aparente y peso específico nominal a la relación entre el peso al aire del sólido y el peso de agua correspondiente a su volumen nominal.

APARATOS

- Balanza, con capacidad mínima de 1000 g y sensibilidad de 0.1 g.



- Matraz aforado o picnómetro, en el que se puede introducir la totalidad de la muestra y capaz de apreciar volúmenes con una exactitud de ± 0.1 cm³. Su capacidad hasta el enrarse será, como mínimo, un 50 por ciento mayor que el volumen ocupado por la muestra.
- Para los tamaños de agregados más finos puede emplearse un matraz aforado de 500 cm³ de capacidad, o un frasco de La Chatelier.
- Molde cónico. Un tronco de cono recto, construido con una chapa metálica de 0.8 mm de espesor como mínimo, y de 40 ± 3 mm de diámetro interior en su base menor, 90 ± 3 mm de diámetro interior en una base mayor y 75 ± 3 mm de altura.
- Varilla para apisonado, metálica, recta, con un peso de 340 ± 15 g y terminada por uno de sus extremos en una superficie circular plana para el apisonado, de 25 ± 3 mm de diámetro.
- Bandejas de zinc, de tamaño apropiado.
- Un dispositivo que proporcione una corriente de aire caliente de velocidad moderada.

PROCEDIMIENTO

- Despues de homogeneizar completamente la muestra y eliminar el material de tamaño superior al tamiz No. 4, se selecciona, por cuarteo, una cantidad aproximada de 1 Kg., que se seca en el horno a 100 - 110 °C, se enfria luego al aire a la temperatura ambiente durante 1 a 3 horas. Una vez fría se pesa, repitiendo el secado hasta lograr peso constante. A continuación, se sumerge en agua y se la deja así sumergida durante 24 ± 4 horas.
- Despues del período de inmersión, se decanta cuidadosamente el agua para evitar la pérdida de finos y se extiende la muestra sobre una bandeja, comenzando la operación de desecar la superficie de las partículas, dirigiendo sobre ella una corriente moderada de aire caliente, mientras se agita continuamente para que la desecación sea uniforme, y continuando el secado hasta que las partículas puedan fluir libremente.
- Para fijar este punto, cuando se empieza a observar visualmente que se está aproximando el agregado a esta condición, se sujetta firmemente el molde cónico con su diámetro mayor apoyado sobre una superficie plana no absorbente, echando en su interior a través de un embudo y sin apelmazar, una cantidad de muestra suficiente,



que se apisona ligeramente con 25 golpes de la varilla, levantando a continuación, con cuidado, verticalmente el molde. Si la superficie de las partículas conserva aún exceso de humedad, el cono de agregado mantendrá su forma original, por lo que se continuará agitando y secando la muestra, realizando frecuentemente la prueba del cono hasta que se produzca un primer desmoronamiento superficial, indicativo de que finalmente ha alcanzado el agregado la condición de superficie seca. El procedimiento descrito anteriormente solamente es válido cuando el desmoronamiento superficial no se produce en la primera prueba, por la falta de seguridad en el estado de humedad superficial que ello comportaría.

➤ Inmediatamente, se introducen en el picnómetro previamente tarado, 500 g del agregado fino, preparado como se ha descrito anteriormente, y se le añade agua hasta aproximadamente un 90 por ciento de su capacidad; para eliminar el aire atrapado se rueda el picnómetro sobre una superficie plana, e incluso agitando o invirtiéndolo si es preciso, introduciéndolo seguidamente en un baño de agua a una temperatura entre 21° y 25°C durante 1 hora, transcurrida la cual se enrasa con agua a igual temperatura, sé saca del baño, se seca rápidamente su superficie y se determina su peso total (picnómetro, muestra y agua), con una aproximación de 0.1g.

➤ Se saca el agregado fino del matraz y se deseca en el horno a 100 - 110 °C, hasta peso constante; se enfriá al aire a temperatura ambiente durante 1 a 1½ horas y se determina finalmente su peso seco.

3.5.6. Peso específico y absorción en agregados gruesos

Referencias normativas: NTP 400.021 – MTC E 206 – 2000 – ASTM C 127

OBJETIVO

Describe el procedimiento que debe seguirse para la determinación de los pesos específicos aparente y nominal, así como la absorción, después de 24 horas de sumergidos en agua, de los agregados con tamaño igual o mayor al tamiz N° 4.

APARATOS

- Balanzas, con capacidad igual o superior a 5000 g, según el tamaño máximo de la muestra para ensayo, con sensibilidad de 0.5 g para pesos hasta de 5000 g.
- Canastillas metálicas, como recipientes para las muestras en las pesadas sumergidas. Se dispondrá de dos tipos de canastillas metálicas, de aproximadamente igual base y altura, fabricadas con armazón de suficiente rigidez y paredes de tela metálica con malla de 3 mm. Para agregados con tamaño máximo inferior a 38 mm



(1 ½") se utilizarán canastillas con capacidades de 4 a 7 dm³ y para tamaños superiores canastillas con capacidades de 8 a 16 dm³ (litros).

- Dispositivo de suspensión. Se utilizará cualquier dispositivo que permita suspender las canastillas de la balanza, una vez sumergida.

PREPARACIÓN DE LA MUESTRA

Se comienza por mezclar completamente los agregados, cuarteándolos a continuación, hasta obtener aproximadamente la cantidad mínima necesaria para el ensayo, después de eliminar el material inferior a 4.75 mm. Las cantidades mínimas para ensayo se indican en la Tabla 15, en función del tamaño máximo nominal del agregado.

Tabla 15. Cantidad mínima de muestra según el tamaño máximo nominal

| Tamaño máximo nominal | | Cantidad mínima de muestra |
|-----------------------|--------|----------------------------|
| mm | (pulg) | Kg |
| Hasta 12,5 | ½ | 2 |
| 19,0 | ¾ | 3 |
| 25,0 | 1 | 4 |
| 37,5 | 1 ½ | 5 |
| 50,0 | 2 | 8 |
| 63,0 | 2 ½ | 12 |
| 75,0 | 3 | 18 |
| 90,0 | 3 ½ | 25 |

Fuente: Manual de Ensayo de Materiales Pág. 2

PROCEDIMIENTO

- La muestra se lava inicialmente con agua hasta eliminar completamente el polvo u otras sustancias extrañas adheridas a la superficie de las partículas; se seca a continuación en una estufa a 100° - 110 °C y se enfriá al aire a la temperatura ambiente durante 1 a 3 horas. Una vez fría se pesa, repitiendo el secado hasta lograr peso constante, y se sumerge en agua, también a temperatura ambiente, durante 24 ± 4 horas.
- Despues del período de inmersión, se saca la muestra del agua y se secan las partículas rodándolas sobre un pifio absorbente de gran tamaño, hasta que se elimine el agua superficial visible, secando individualmente los fragmentos mayores. Se tomarán las precauciones necesarias para evitar cualquier evaporación de la superficie de los agregados. A continuación, se determina el peso de la muestra en el estado de saturada con superficie seca (S.S.S.). Estas y todas las pesadas



subsiguentes se realizarán con una aproximación de 0.5 g para pesos hasta 5000 g y de 0.0001 veces el peso de la muestra para pesos superiores.

- A continuación, se coloca la muestra en el interior de la canastilla metálica y se determina su peso sumergida en el agua, a la temperatura entre 21° y 25 °C y un peso unitario de $0.997 \pm 0.002 \text{ g/cm}^3$. Se tomarán las precauciones necesarias para evitar la inclusión de aire en la muestra sumergida, agitando convenientemente. La canastilla y la muestra deberán quedar completamente sumergidas durante la pesada y el hilo de suspensión será lo más delgado posible para que su inmersión no afecte a las pesadas.
- Se seca entonces la muestra en horno a 100° - 110 °C, se enfriá al aire a la temperatura ambiente durante 1 a 3 horas y se determina su peso seco hasta peso constante.

3.5.7. Ensayo de tracción directa a varillas de acero (límite de fluencia)

Los ensayos de tracción de los alambres de acero están basados en la norma ASTM A881 y ASTM A421, que fueron realizados en la Maquina Universal del Laboratorio de Mecánica de Suelos, de la escuela profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco. El objetivo de las pruebas fue determinar las propiedades mecánicas del alambre de alta resistencia.

3.5.8. Resistencia a la compresión axial del concreto de diseño

Los resultados del ensayo para determinar la compresión axial de los testigos cilíndricos de concreto se obtuvieron mediante la aplicación del método recomendado en la norma NTP.339.034. HORMIGÓN (CONCRETO): “Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas” y el ACI 318S-05 “Requisitos del reglamento para concreto estructural”.

3.5.9. Pruebas a flexión utilizando la maquina universal.

Para realizar las pruebas a flexión mediante la maquina universal, se realizará una variante de los requisitos de las normas ASTM C31/C31M y ASTM C192/C192M, aplicables a los especímenes de vigas y teniendo una luz libre entre apoyos de 0.90 m, al momento de ensayarlos. Los lados del espécimen deben estar a ángulos rectos con las caras superiores e inferiores. Todas las superficies del espécimen deben ser lisas, libres de cicatrices, indentaciones, agujeros o marca de identificación inscritas.



3.5.10. Prueba de flexión en campo.

El laboratorio de materiales de la escuela profesional de ingeniería civil no posee con una máquina para realizar ensayos a flexión con muestras de más de un metro de longitud, por este motivo se simuló un ensayo de flexión en campo siguiendo la metodología que utiliza la empresa Vipret para ensayar las viguetas pre esforzadas que esta fabrica (Vipret, s.f.).

PROCEDIMIENTO

1. Se procede al armado de dos viguetas pre esforzadas simulando la instalación de un metro cuadrado de losa sobre dos apoyos simples separados cuatro metros.
2. Colocar una superficie que asegure la transmisión de cargas sobre las viguetas pre esforzadas, puede ser una pequeña capa de concreto o de cualquier otro material.
3. Para controlar las deflexiones se colocan dos cuerdas que marquen la horizontalidad entre los apoyos, sobre las cuales se harán las mediciones respectivas.
4. Empieza el proceso de carga sobre las viguetas pre esforzadas con bolsas de cemento de 42.5 Kg cada una, simulando una carga distribuida, a medida que se aumenta la carga se realizan las mediciones de deflexiones en ambas viguetas.
5. Luego de ensayar las viguetas pre esforzadas hasta la carga de diseño se procede a la etapa de descarga midiendo las deflexiones.
6. Una vez se tenga las viguetas pre esforzadas descargadas completamente, se procede a ensayar las viguetas pre esforzadas hasta la resistencia ultima, esto quiere decir que se cargan las viguetas hasta su ruptura controlando siempre las deflexiones.

3.5.11. Encuestas.

Dentro de la investigación proyectiva se toma una encuesta como técnica de recolección de datos. La encuesta es útil para obtener un primer contacto con la realidad a investigar y proyectar un posible escenario luego de la aplicación del proyecto propuesto como solución. Puesto que existen numerosas definiciones de encuesta, señalamos los aspectos propios de este tipo que nos ayudarán a obtener una definición, independientemente de la herramienta que utilicen para la recogida de datos. Los rasgos propios de las encuestas son los siguientes:

- Permiten recoger información mediante la formulación de preguntas que se realizan a los sujetos en una entrevista personal, por teléfono o por correo.



- Pretenden hacer estimaciones de las conclusiones a la población de referencia a partir de los resultados obtenidos de la muestra.

Para la determinación de la muestra de este trabajo de investigación se utilizó el muestreo no probabilístico intencional, que consiste en la selección de sujetos que son expertos en un tema o relevantes como fuentes de información.

Para la recolección de datos del trabajo de investigación se utilizaron como muestra homogénea solo a ingenieros civiles encargados de diseños y construcción de edificios familiares.

3.6. Tratamiento estadístico

El tratamiento estadístico posibilita la obtención de parámetros que ayudan al mejor análisis de los resultados, por el medio de la estadística, se usan distintas herramientas como son los cálculos de parámetros, para mejor entendimiento, así como también las representaciones gráficas que harán más clara y evidente la información que dan las tablas.

A continuación, abordamos muy brevemente algunos de los parámetros estadísticos que se usaron para el tratamiento de los datos obtenidos.

- Media: es el cociente entre la suma de todos los valores de la serie y el número de datos de la serie.

$$\bar{X} = \sum \frac{x_i}{N}$$

- Varianza y la desviación típica: son parámetros de uso común. La varianza es la media aritmética de los cuadrados de las diferencias de cada valor con respecto a la media.

$$\sigma^2 = \frac{\sum [x_i - \bar{X}]^2}{N}$$

- La desviación típica o estándar es la raíz cuadrada de la varianza.

$$\sigma = \sqrt{\sigma^2}$$

- Coeficiente de variación: es el cociente entre la desviación típica y la media aritmética.
- Tablas en las cuales se muestran el resumen de los datos obtenidos en cada ensayo.
- Tablas resumen, utilizados en el análisis de los datos.



- Representaciones graficas como:
 - Diagrama de barras.
 - Diagrama de sectores.
 - Curvas (Representación de un cuadro de doble entrada).



CAPÍTULO IV

4. CONTROL DE CALIDAD DE LOS MATERIALES

4.1. Canteras utilizadas para diseño de mezclas en la ciudad de Cusco

4.1.1. Características de las canteras

Según el estudio realizado en la tesis intitulada “DISEÑO DE MEZCLAS CON LOS DIFERENTES AGREGADOS UTILIZADOS EN LA CIUDAD DE CUSCO” (Rozas Gomez & Palma Vargas, 2012) existen seis canteras cercanas a la ciudad de Cusco las cuales son Huambutio, Kunyaq, Pisaq, Vicho, Zurite y Huilque.

Para el presente trabajo de investigación se estudiaron los agregados de dos canteras adicionales que también son muy utilizadas en la ciudad del Cusco, para agregado fino se utilizó una cantera ubicada en Vilcabamba – Quillabamba, y para agregado grueso se utilizó una cantera ubicada en Huandar – Pisaq.

4.1.1.1. Cantera de Vilcabamba

Esta Cantera se encuentra ubicada aproximadamente a 246 km. de la ciudad del Cusco, Provincia de Quillabamba.

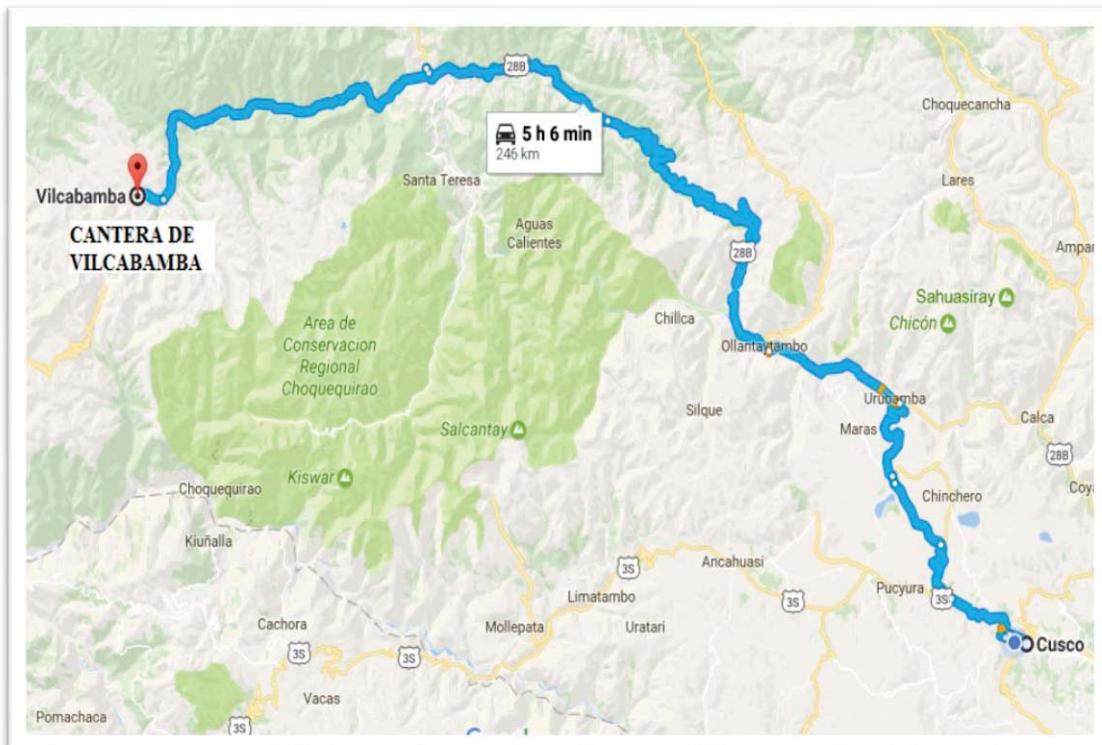


Figura 33. Mapa de localización de la Cantera Vilcabamba.



Esta cantera se encuentra vigente en la actualidad, la cual tiene predominio de la roca de granito de la forma de Bartolito, se encuentra dentro de la ramificación de las siguientes canteras: Sallacmarca, Intipata, Palcay, Paucarcancha, entre otros.

4.1.1.2. Cantera de Huandar

Esta Cantera se encuentra ubicada aproximadamente a 34.8 km. de la ciudad del Cusco, Provincia de Calca.

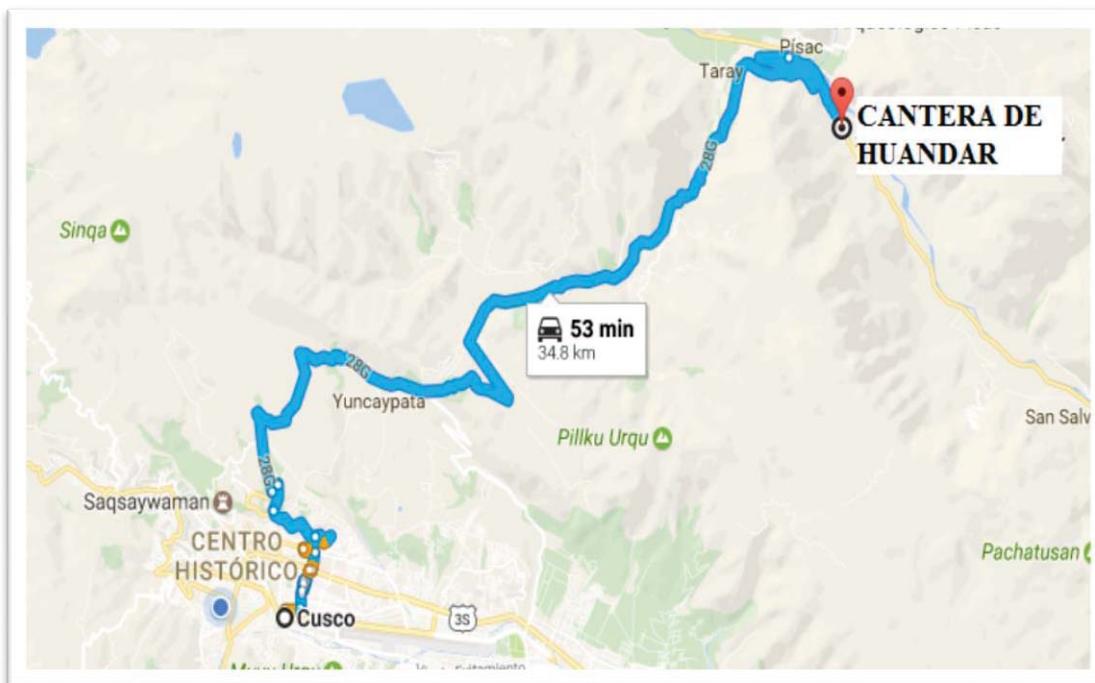


Figura 34. Mapa de localización de la Cantera de Huandar.

Se localiza en el distrito de Pisac, existe un predominio de la roca andesita con la cual se construyó en centro arqueológico de Pisac.

4.1.2. Clasificación de las canteras según su procedencia geológica.

En Geología, la mezcla de minerales formados de un modo natural se llama roca. En la construcción se habla de piedras naturales, o simplemente piedras. El origen de los agregados es una característica muy importante que debe ser tomada en cuenta por el ingeniero para lograr un comportamiento adecuado del concreto, la clasificación de las rocas se puede realizar desde varios puntos de vista, a continuación, realizaremos la siguiente clasificación:



4.1.2.1. Cantera de Vilcabamba

Según la carta geológica esta cantera está ubicada en los cuadrángulos de Quillabamba (26-q) y Machupicchu (27-q) se localizan en la Cordillera Oriental, en pleno núcleo de la Deflexión de Abancay. Resalta la presencia de la Cordillera de Vilcabamba que tiene varias cadenas de nevados, incluyendo el Salcantay (6 264 msnm).

La vertiente norte de esta cordillera se caracteriza por tener un relieve fuerte que empieza a disminuir progresivamente hacia la Ceja de Selva. Los valles de los ríos Apurímac y Urubamba forman cañones al atravesar gran parte de este sistema montañoso.

La Cordillera Oriental ha sido dividida en 3 dominios estructurales: Dominio Norte, Dominio Central y Dominio Sur. El Grupo Mitu (vulcano-sedimentario) sobre yace en discordancia erosional al Permo-carbonífero y es considerado del Permiano superior-Triásico inferior. Para esta unidad se definen tres dominios paleogeográficos: de Vilcabamba y norte de Quillabamba, vulcano-sedimentario; de Huanipaca, esencialmente conglomerádico de cono aluvial; y de Apayhuana (norte de Cachora-Curahuasi), de areniscas, lutitas y calizas marinas. La cantera de Vilcabamba es esencialmente bartolito.

4.1.2.2. Cantera de Huandar

Según la carta geológica esta cantera está ubicada en las coordenadas UTM 8512 S y 194 E, y observando en la geología del cuadrángulo de Calca (27-s) nos da una clasificación Q-al, siendo esta perteneciente a la edad cuaternaria en formaciones y eventos geohistóricos aluviales de origen sedimentario comparte formación con la cantera de Pisac.

DEPÓSITOS RECIENTES

Los depósitos recientes son de cuatro tipos:

- Depósitos aluviales
- Depósitos eluviales
- Depósitos glaciares y fluvio-glaciares
- Productos del volcanismo reciente

DEPOSITOS ALUVIALES: (Q-al) Dentro de estos depósitos, hemos considerado los conos tanto aluviales como los de deyección. Estos conos están adosados principalmente a la desembocadura de las quebradas adyacentes al valle del río Vilcanota-Urubamba, de los ríos Lucumayo, Ocobamba y Lares (Cuadrángulo de Urubamba) y los ríos Paucartambo, Yanatili y Kosñipata (Cuadrángulo de Calca), producto de un cambio repentino de pendiente. Dentro de los conos resaltan las quebradas de Pumahuanca,



Chicón, Yanahuara, Calca y Hualancay; los que están conformados por grandes bloques de granitos, cuarcitas, rocas volcánicas, etc., envueltos por una matriz arenoso-argilosa.

DEPOSITOS FLUVIALES: (Q-f)

Estos depósitos han sido reconocidos en el fondo de los valles particularmente del Vilcanota-Urubamba, de los ríos Lucumayo, Ocabamba y Lares (Cuadrángulo de Urubamba) y los ríos Paucartambo y Yanatile. (Cuadrángulo de Calca), donde están constituidos por bancos de gravas y arenas, formando una o varias terrazas. En el mapa geológico, no se han considerado muchos de los depósitos fluviales pequeños, debido a razones de escala.

4.2. Parámetros límite recomendados por la ASTM

4.2.1. El agua

REQUISITOS QUE DEBE CUMPLIR

El agua empleada en la preparación y curado del concreto deberá cumplir con los requisitos de la Norma NTP 334.088 y ser de preferencia, potable. No existen criterios uniformes en cuanto a los límites permisibles para las sales y sustancias en el agua que va emplearse. A continuación, se presenta, en partes por millón, los valores aceptados como máximos para el agua utilizada en la preparación del concreto:

Tabla 16. Valores aceptados como máximo para el agua.

| SUSTANCIAS DISUELTA | VALOR MAX. ADMISIBLE |
|------------------------|----------------------|
| Cloruros | 300 ppm |
| Sulfatos | 300 ppm |
| Sales de magnesio | 150 ppm |
| Sales solubles totales | 500 ppm |
| P.H. | mayor a 7 |
| Sólidos en suspensión | 1500 ppm |
| Materia orgánica | 10 ppm |

Fuente: Materiales para el Concreto – Ing. Enrique Riva López – Pág. 129 (Riva Lopez)

La Norma Peruana NTP 339.088 considera aptas para la preparación y curado del concreto, aquellas aguas cuyas propiedades y contenidos de sustancias disueltas están comprendidos dentro de los siguientes límites:



- A. El contenido máximo de materia orgánica, expresada en oxígeno consumido, será de 3 mg/l (3 ppm).
- B. El contenido de residuo insoluble no será mayor de 5 gr/l (5000 ppm).
- C. El pH estará comprendido entre 5.5 y 8.0.
- D. El contenido de sulfatos, expresado como ion S04, será menor de 0,6 gr/l (600 ppm).
- E. El contenido de cloruros, expresado como ion Cl, será menor de 1 gr/l (1000 ppm).
- F. El contenido de carbonatas y bicarbonatos alcalinos (alcalinidad total) expresada en NaHC03, será menor de 1 gr/l (1000 ppm).
- G. Si la variación de color es un requisito que se desea controlar, el contenido máximo de fierro, expresado en ion férrico, será de 1 ppm.

El agua deberá estar libre de azúcares o sus derivados. Igualmente lo estará de sales de potasio o de sodio. Si se utiliza aguas no potables, la calidad del agua, determinada por análisis de laboratorio, deberá ser aprobada por la supervisión.

4.2.2. Agregado grueso

La cantidad de sustancias deletéreas o partículas inconvenientes presentes en el agregado grueso, como porcentaje en peso de la muestra, no deberá exceder de los límites indicados en la siguiente tabla:

Tabla 17. Valores admisibles para el Agregados gruesos

| ENSAYOS | VALOR MAX. ADMISIBLE |
|---|-------------------------|
| Partículas Deleznables | 3.00% |
| Material más Fino que el Tamiz Normalizado 75 μm (Nº 200) | --- |
| Concreto sujeto a Abrasión | 1.00% |
| Otros Concretos | 1.00% |
| Carbón y Lignito | 0.50% |
| Impurezas Orgánicas | --- |

Fuente: Norma Técnica Peruana NTP 400.037 Pág:10

La granulometría del agregado grueso, será determinada de acuerdo a lo estipulado en la NTP 400.037 y deberá cumplir con la gradación de la siguiente tabla:



Tabla 18. Granulometría del agregado grueso según la NTP.

| HUSO | TAMAÑO MAXIMO NOMINAL | | PORCENTAJE QUE PASA POR LOS TAMICES NORMALIZADOS | | | | | | | | | | | | | |
|------|-----------------------|----------|--|--------|----------|--------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|----------|---------|--------|
| | mm | Pulgadas | 100 mm | 90 mm | 75 mm | 63 mm | 50 mm | 37.5 mm | 25 mm | 19 mm | 12.5 mm | 9.5 mm | 4.75 mm | 2.36 mm | 1.18 mm | 300 um |
| | | | 4" | 3 1/2" | 3" | 2 1/2" | 2" | 1 1/2" | 1" | 3/4" | 1/2" | 3/8" | Nº 4 | Nº 8 | Nº 16 | Nº 50 |
| 1 | 90 | a 38 | 3 1/2" a 1 1/2" | 100 | 90 a 100 | – | 25 a 60 | – | 0 a 15 | – | 0 a 15 | – | – | – | – | – |
| 2 | 63 | a 38 | 2 1/2" a 1 1/2" | – | – | 100 | 90 a 100 | 35 a 70 | 0 a 15 | – | 0 a 5 | – | – | – | – | – |
| 3 | 50 | a 25 | 2" a 1" | – | – | – | 100 | 90 a 100 | 35 a 70 | 0 a 15 | – | 0 a 5 | – | – | – | – |
| 357 | 50 | a 4.8 | 2" a Nº 4 | – | – | – | 100 | 95 a 100 | – | 35 a 70 | – | 10 a 30 | – | 0 a 5 | – | – |
| 4 | 38 | a 19 | 1 1/2" a 3/4" | – | – | – | – | 100 | 90 a 100 | 20 a 55 | 0 a 5 | – | 0 a 5 | – | – | – |
| 467 | 38 | a 4.8 | 1 1/2" a Nº 4 | – | – | – | – | 100 | 95 a 100 | – | 35 a 70 | – | 10 a 30 | 0 a 5 | – | – |
| 5 | 25 | a 13 | 1" a 1/2" | – | – | – | – | – | 100 | 90 a 100 | 20 a 55 | 0 a 10 | 0 a 5 | – | – | – |
| 56 | 25 | a 9.5 | 1" a 3/8" | – | – | – | – | – | 100 | 90 a 100 | 40 a 85 | 10 a 40 | 0 a 15 | 0 a 5 | – | – |
| 57 | 25 | a 4.8 | 1" a Nº 4 | – | – | – | – | – | 100 | 95 a 100 | – | 25 a 60 | – | 0 a 10 | 0 a 5 | – |
| 6 | 19 | a 9.5 | 3/4" a 3/8" | – | – | – | – | – | – | 100 | 90 a 100 | 20 a 55 | 0 a 15 | 0 a 5 | – | – |
| 67 | 19 | a 4.8 | 3/4" a Nº 4 | – | – | – | – | – | – | 100 | 90 a 100 | – | 20 a 55 | 0 a 10 | 0 a 5 | – |
| 7 | 13 | a 4.8 | 1/2" a Nº 4 | – | – | – | – | – | – | – | 100 | 90 a 100 | 40 a 70 | 0 a 15 | 0 a 5 | – |
| 8 | 9.5 | a 2.4 | 3/8" a Nº 8 | – | – | – | – | – | – | – | – | 100 | 85 a 100 | 10 a 30 | 0 a 10 | 0 a 5 |
| 89 | 9.5 | a 1.2 | 3/8" a Nº 16 | – | – | – | – | – | – | – | – | 100 | 90 a 100 | 20 a 55 | 5 a 30 | 0 a 10 |
| 9 | 4.8 | a 1.2 | Nº 4 a Nº 16 | – | – | – | – | – | – | – | – | – | 100 | 85 a 100 | 10 a 40 | 0 a 10 |

Fuente: Norma Técnica Peruana NTP 400.037 Pág:08

4.2.3. Agregado fino

La granulometría del agregado fino, será determinada de acuerdo a lo estipulado en la NTP 400.012 y deberá cumplir con los límites de la siguiente tabla:

Tabla 19. Granulometría del Agregado fino según la NTP.

| MALLA | % QUE PASA |
|--------|------------|
| 3/8" | 100 |
| Nº 4 | 95 - 100 |
| Nº 8 | 80 - 100 |
| Nº 16 | 50 - 85 |
| Nº 30 | 25 - 60 |
| Nº 50 | may-30 |
| Nº 100 | 0 - 10 |

Fuente: Norma Técnica Peruana NTP 400.037 Pág.: 9

Se permitirán el uso de agregados que no cumplan con las gradaciones especificadas, siempre en cuando existan estudios calificados que aseguren que el material producirá concreto de la calidad requerida. La cantidad de sustancias deletéreas o partículas inconvenientes presentes en el agregado fino, como porcentaje en peso de la muestra, no deberá exceder de los límites indicados en la siguiente tabla:



Tabla 20. Valores admisibles para el Agregado fino.

| ENSAYOS | VALOR MAX. ADMISIBLE |
|--|--|
| Partículas Deleznable | 3.00% |
| Material más Fino que el Tamiz Normalizado 75 µm (Nº 200) | |
| Concreto sujeto a Abrasión | 3.00% |
| Otros Concretos | 5.00% |
| Carbón y Lignito | 0.50% |
| Impurezas Orgánicas | El agregado fino que no demuestre presencia nociva de materia orgánica, cuando se determine según lo estipulado la NTP 400.024, se deberá considerar satisfactorio. El agregado fino que no cumpla con el ensayo anterior, podrá ser utilizado si al determinarse el efecto de las impurezas orgánicas sobre la resistencia de morteros, según lo estipulado en la NTP 400.013, la resistencia relativa a los 7 días no sea menor de 95% |
| Nº 100 | 0 – 10 |

Fuente: Norma Técnica Peruana NTP 400.037 Pág:10

4.3. Estudio de los agregados

4.3.1. Agregado fino y grueso

4.3.1.1. Absorción de agregado

Es la capacidad de los agregados de llenar con agua los vacíos al interior de las partículas.

El fenómeno se produce por capilaridad, no llegándose llenar absolutamente los poros indicados pues siempre queda aire atrapado.

Tiene importancia pues se refleja en el concreto reduciendo el agua de mezcla, con influencia en las propiedades resistentes y en la trabajabilidad, por lo que es necesario tenerla siempre en cuenta para hacer las correcciones necesarias. Las Normas ASTM C-127 y C-128 establecen la metodología para su determinación expresada en la siguiente formula:

$$\% \text{absorción} = \frac{\text{Peso sss} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} * 100$$



4.3.1.2. Contenido de humedad del agregado

Es la cantidad de agua superficial retenida en un momento determinado por las partículas del agregado. Es una característica importante pues contribuye a incrementar el agua de mezcla en el concreto, razón por la que se debe tomar en cuenta conjuntamente con la absorción para efectuar las correcciones adecuadas en el proporcionamiento de las mezclas, para que se cumplan las hipótesis asumidas.

La humedad se expresa de la siguiente manera según ASTM C-566.

$$\% \text{humedad} = \frac{\text{Peso original de la muestra} - \text{Peso seco}}{\text{Peso seco}} * 100$$

4.3.1.3. Peso específico

Es el cociente de dividir el peso de las partículas entre el volumen de las mismas sin considerar los vacíos entre ellas. Las Normas ASTM C-127 y C-128 establecen el procedimiento estandarizado para su determinación en laboratorio, distinguiéndose tres maneras de expresarlo en función de las condiciones de saturación.

4.3.1.4. Análisis granulométrico

Es la representación numérica de la distribución volumétrica de las partículas por tamaño. Los valores hallados se representan gráficamente en un sistema coordenado semilogarítmico que permite apreciar la distribución acumulada.

Cuando se representa la distribución granulométrica de la mezcla de agregados de pesos específicos que no difieren mucho, la granulometría es prácticamente igual sea la mezcla en peso o en volumen absoluto, pero cuando se trata de agregados de pesos específicos muy diferentes, hay que hacer las conversiones a volumen absoluto para que se presenten realmente la distribución volumétrica que es la que interesa para la elaboración del concreto.

La serie de tamices estándar ASTM para concreto tiene la particularidad que se empieza por el tamiz de abertura cuadrada 3" y el siguiente tiene una abertura igual a la mitad de la anterior. A partir de la malla 3/8" se mantiene la misma secuencia, pero el nombre de las mallas se establece en función al número de aberturas por pulgada cuadrada.

El significado práctico de análisis granulométrico de los agregados estriba en que la granulometría influye directamente en muchas propiedades del concreto fresco, así como en algunas del concreto endurecido, por lo que interviene como elemento indispensable en todos los métodos de diseño de mezclas.



4.3.1.5. Peso unitario

Es el cociente de dividir el peso de las partículas entre el volumen total incluyendo los vacíos. Al incluir los espacios entre partículas, está influenciado por la manera en que se acomodan estas lo que lo convierte hasta cierto punto en parámetro hasta cierto punto relativo. La Norma ASTM C-29. El valor obtenido es el que se emplea en algunos métodos de diseño de mezclas para estimar las proporciones y también para hacer conversiones de dosificación en peso y dosificaciones en volumen. En este último caso hay que tener en cuenta que estas conversiones asumen que el material en estado natural tiene el peso unitario obtenido en la prueba estándar, lo cual no es cierto por las características de compactación indicadas. Algunas personas aplican el mismo ensayo peso sin compactar el agregado para determinar el peso unitario suelto, sin embargo, este valor tampoco es necesariamente el del material en cancha, por lo que se introducen también errores al hacer conversiones de diseños en peso a volumen. La mejor recomendación para reducir el error aludido, es hacer por lo menos 3 determinaciones de peso unitario suelto en porciones de muestra de agregados que representen varios niveles de las pilas de almacenaje para reflejar las probables variaciones por segregación.

4.3.1.6. Cantidad de material fino que pasa el tamiz N° 200

Tiene trascendencia en la adherencia entre el agregado y la pasta, afectando la resistencia. Por otro lado, las mezclas requieren una mayor cantidad de agua, por lo que se acostumbra limitarlos a 3%, aunque valores superiores hasta el orden del 7% no necesariamente causaran un efecto pernicioso notable que no pueda contrarrestarse mejorando el diseño de mezclas, bajando la relación Agua/Cemento y/o optimizando la granulometría.

4.4. DISEÑO DE MEZCLA DE CONCRETO

La resistencia a la compresión del concreto f'_c es el parámetro de referencia más difundido tanto a nivel de diseño estructural. La resistencia a la compresión se puede definir como la máxima resistencia medida de un espécimen de concreto o a carga axial. Generalmente se expresa en kilogramos por centímetro cuadrado (Kg/cm^2) a una edad de 28 días se le designa con el símbolo f'_c . Para determinar la resistencia a la compresión, se realizan pruebas de especímenes de concreto, los ensayos a compresión del concreto se efectúan sobre cilindros que miden 6" de diámetro y 12" de altura. La resistencia del concreto a la compresión es una propiedad física fundamental, y es frecuentemente empleada en los cálculos para diseño de puentes, de edificios y otras estructuras. El



concreto de uso generalizado tiene una resistencia a la compresión entre 140 kg/cm² y 350 kg/cm²; un concreto de alta resistencia tiene una resistencia a la compresión de 420 kg/cm².

4.4.1. Aspecto teórico del diseño

INTRODUCCION

El diseño de mezclas de concreto, es conceptualmente la aplicación técnica y práctica de los conocimientos científicos sobre sus componentes y la interacción entre ellos, para lograr un material resultante que satisfaga de la manera más eficiente los requerimientos particulares del proyecto constructivo. Es usual el suponer que esta técnica consiste en la aplicación sistemática de ciertas tablas y proporciones ya establecidas que satisfacen prácticamente todas las situaciones normales en las obras, lo cual está muy alejado de la realidad, ya que es en esta etapa del proceso constructivo cuando resulta primordial la labor creativa del responsable de dicho trabajo y en consecuencia el criterio personal.

Cuando nos referimos a mezclas normales lo hacemos a concretos con densidades entre 2,300 a 2,400 kg/m³ y en resistencias máximas del orden de 350 a 400 kg/cm², que en la actualidad no son difíciles de lograr si se optimizan adecuadamente todos los parámetros.

Para los efectos de estimar cantidades de estimar cantidades de agua de amasado, contenidos de aire atrapado, relaciones Agua /Cemento, recomendaciones de asentamiento y aire incorporado, nos vamos a referir en todos los casos a las tablas elaboradas por el comité ACI-211, ya que, pese a no ser aplicables en forma absoluta para todos los casos, nos dan un punto de partida conservador y científicamente respaldado, para luego perfeccionar los parámetros en base a los resultados prácticos.

Debemos advertir finalmente que la etapa de diseño de mezclas de concreto antes que el fin de un proceso, representa solo el inicio de la búsqueda de la mezcla más adecuada para el caso que abordemos, y ninguno de los métodos que trataremos puede soslayar la prueba definitiva que supone el empleo de los diseños en condiciones reales y su optimización en obra.

EL PRINCIPIO DE LOS VOLUMENES ABSOLUTOS

Todos los métodos de diseño de mezclas exactos, se basan en el principio de considerar en el cálculo, los volúmenes de los componentes sin incluir los vacíos entre ellos, de manera que sumados conjuntamente con el aire que atrapa el concreto suministren la unidad de medida que se esté adoptando, que usualmente es 1m³.

En consecuencia, se trabaja en los cálculos con el peso específico de los sólidos, también



llamado gravedad específica o peso específico de masa, sea en condición seca o saturada superficialmente seca para obtener los volúmenes sólidos de los componentes, de modo de dosificarlos adecuadamente para lograr la unidad volumétrica de medida.

RESISTENCIA A LA COMPRESIÓN Y LA RELACION AGUA/CEMENTO

Dado que por lo general la resistencia en compresión es un requisito fundamental que emana del proyecto estructural, o en algunas ocasiones el proyectista exige consideraciones especiales de durabilidad, se deriva entonces que un parámetro ineludible en el diseño de mezclas es la relación Agua/Cemento, pues como ya hemos visto al evaluar los conceptos sobre los materiales en el concreto, este parámetro regula dicho comportamiento.

Los valores se han determinado experimentalmente para concreto sin aire incorporado con hasta 2% de aire atrapado, y tienen validez para concretos hasta con 6% de aire incorporado. Las resistencias correspondientes a probetas cilíndricas estándar de 6" x 12" curadas en condiciones controladas y concreto con agregado grueso de tamaño máximo entre 3/4 a 1".

La resistencia a la compresión del concreto f'_c , siendo una de las metas del diseño de mezcla, es una característica muy importante en este material, debido a que el concreto de la edificación debe alcanzar la resistencia mecánica requerida por el proyecto estructural; no hay que olvidar, sin embargo, que otras características tales como la durabilidad, permeabilidad y resistencia a la abrasión, son frecuentemente tanto o más importantes que la primera para casos especiales de obras.

Estas últimas características están relacionadas en una forma general con la resistencia, pero son afectadas por otros factores no directamente asociados a esta, por lo que la búsqueda de estas características junto con la resistencia, o con preferencia a ella, requieren un tratamiento diferente.

En cuanto a la resistencia a la compresión; para las mismas condiciones ambientales generales y un mismo tipo de agregados y cemento, la resistencia depende directamente de la relación a/c; por agua, se entiende "el agua libre" (la cantidad neta de agua excluye la que es tomada por absorción de los agregados); sin embargo, pueden ocurrir diferencias en la resistencia para una misma relación a/c, si hay cambios en el tamaño máximo del agregado, en la granulometría, superficie, textura, forma, resistencia propia y rigidez de las partículas del agregado.

Por supuesto, la resistencia también se afecta si hay diferencias en el cemento, alta



presencia de aire incorporado, cualquiera que fuera su origen, y el uso de aditivos que afecten el proceso de hidratación del cemento, o que desarrollan propiedades cementicias por sí mismos, como el caso de la puzolana contenida en el cemento Yura IP.

Como quiera que parte de estos factores no sean fácilmente controlables en la obra, el procedimiento de diseño propuesto los toma en cuenta mediante factores de seguridad.

Es importante establecer que hay un límite práctico a la cantidad de cemento por metro cúbico que se puede utilizar sin incurrir en un concreto con calor de hidratación muy alto, contracción de fragua-aumentada y otros potenciales problemas. Este límite se fija en 11 bolsas de cemento, por metro cúbico.

LA GRANULOMETRÍA DE LOS AGREGADOS Y EL TAMAÑO MÁXIMO DE LA PIEDRA

Esta generalizado mundialmente el criterio de utilizar las granulometrías o gradaciones de agregados que provean el mejor acomodo entre las partículas creando una estructura muy densa, resistente, impermeable y favoreciendo la trabajabilidad. En este sentido existen una gran variedad de opciones en cuanto a cómo evaluar dichas gradaciones y cómo combinarlas, que dependen de la mayor o menor confiabilidad que se le asigne al sustento técnico de cada una, por los que esta etapa es la que diferencia un método de diseño de otro. No se pueden establecer pues criterios absolutos en este aspecto, pero, sin embargo, casi todos usan de alguna manera el concepto del Módulo de Fineza por el sustento teórico y experimental, con lo que constituye un parámetro que siempre está ligado de alguna manera al diseño.

Dentro de la granulometría, un factor importante, es el Tamaño Máximo del agregado y su forma. Está justificado experimentalmente que este influye en la cantidad de agua que requiere la mezcla para satisfacer condiciones de trabajabilidad, así cuanto mayor sea el tamaño del agregado y más redondeado, menor será el requerimiento de agua.

Todo el agregado mineral que se utiliza en la mezcla, por razones de su granulometría, se clasifica usando límites arbitrarios en agregado grueso es decir piedra y fino o arena. Estos, constituyen tres cuartas partes del volumen del concreto, puede verse como consecuencia, que su calidad tiene que influir en la del concreto.

Si bien la resistencia del concreto con una relación a/c dada, es independiente del tamaño de los agregados, la granulometría de los agregados es importante porque afecta e interviene en la trabajabilidad de la mezcla y porque desde el punto de vista de costo, los agregados deben ocupar con cierto ordenamiento un volumen terminado de concreto; sin



embargo, debe siempre cuidarse que no ocurra segregación.

El primer objetivo de una buena granulometría es entonces hacer que la mezcla sea consistente y trabajable puesto que el desarrollo de la máxima resistencia de una mezcla de concreto con una determinada relación a/c solo se consigue mediante una compactación completa de la mezcla a la máxima densidad, con un trabajo de compactación razonable.

El segundo objetivo es lograr un buen acomodo de los granos para formar una masa muy consistente, con poca tendencia a segregar, conducente a un concreto denso, resistente y económico.

COMO DETERMINAR UNA CURVA GRANULOMÉTRICA ADECUADA

Los principales factores que gobiernan una granulometría ideal de agregados son:

- La superficie específica de los agregados, que determine los requerimientos de agua en la mezcla, para mojar todos los granos.
- El volumen relativo ocupado por los agregados.
- La trabajabilidad de la mezcla.
- La tendencia a la segregación.

Todos estos factores están complejamente interrelacionados entre si y los fenómenos y mecanismos de acción conexos no son totalmente entendidos, así pues, se ha llegado a las recomendaciones que indican las normas, mediante experimentación sustentada en la teoría expuesta, ya que un tratamiento matemático del tema es muy complejo por la variabilidad de los materiales y el requerimiento de pruebas de laboratorio muy complejas y costosas que no son prácticas para la tarea de obra.

4.4.2. Información requerida para el diseño de mezclas

4.4.2.1. Alcance

En la selección de las proporciones de la mezcla de concreto es necesario conocer, además de las propiedades que se requieren y del empleo que se va a dar al concreto, como las características geográficas y ambientales de la zona en la cual él va a ser utilizado, información básica sobre las propiedades de los materiales integrantes del mismo. En este sentido y como cuestión fundamental, la selección de las proporciones de la mezcla deberá basarse en la información obtenida de los resultados de los ensayos de laboratorio de los materiales a ser utilizados. La información útil para un adecuado diseño de mezcla es la siguiente:



4.4.2.2. Cemento

En el caso del cemento es importante conocer:

- Tipo y marca del cemento seleccionado.
- Peso específico del cemento a utilizar (Cemento Portland Puzolanico IP de Yura S.A, el cual contiene un 30% de Puzolana).
- Superficie específica del cemento.

4.4.2.3. Agua

El agua empleada en la preparación y curado del concreto deberá cumplir con los requisitos de la norma NTP 339.088 (ver cuadro N° 12), y ser de preferencia potable.

4.4.2.4. Agregados

En el caso de los agregados fino y grueso es importante conocer:

- Perfil y textura superficial.
- Análisis granulométrico.
- Peso específico de masa.
- Peso unitario suelto y compactado.
- Porcentaje de absorción y contenido de humedad.
- Perdida por abrasión, si el agregado va ser empleado en concreto para pavimentos.
- Presencia de materia orgánica.

4.4.2.5. Tablas de diseño de mezclas

A continuación, mostramos los cuadros de diseño (Tabla 21), utilizada para las diferentes combinaciones propuestas.



**Tabla 21. Cantidades aproximadas de agua de amasado para diferentes SLUMP,
tamaño máximo de agregado y contenido de aire.**

| AGUA, Kg/m ³ CONCRETO PARA TMG | | | | | | | | |
|---|-----|------|------|------|------|------|------|-------|
| Revenimiento (cm) | 9.5 | 12.5 | 19.0 | 25.0 | 38.0 | 50.0 | 75.0 | 150.0 |
| | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| concreto sin aire incluido | | | | | | | | |
| De 2.5 a 5.0 | 207 | 199 | 190 | 179 | 166 | 154 | 130 | 113 |
| De 7.5 a 10 | 228 | 216 | 205 | 193 | 181 | 169 | 145 | 124 |
| De 15 a 17.5 | 243 | 228 | 216 | 202 | 190 | 178 | 160 | - |
| Cantidad aprox. Aire atrapado | 3.0 | 2.50 | 2.00 | 1.50 | 1.00 | 0.50 | 0.30 | 0.20 |
| concreto sin aire incluido | | | | | | | | |
| De 2.5 a 5.0 | 181 | 175 | 168 | 160 | 150 | 142 | 122 | 107 |
| De 7.5 a 10 | 202 | 193 | 184 | 175 | 165 | 157 | 133 | 119 |
| De 15 a 17.5 | 216 | 205 | 197 | 174 | 174 | 166 | 154 | - |

Fuente: Tópicos de Tecnología del Concreto – Ing. Enrique Pasquel C. pag. 176

Tabla 22. Relación agua/cemento vs f'c

| F'c (kg/cm ²) | Relación agua cemento en peso | |
|------------------------------|--------------------------------|--------------------------------|
| | Concretos sin aire incorporado | Concretos con aire incorporado |
| 150 | 0.80 | 0.70 |
| 200 | 0.70 | 0.61 |
| 250 | 0.62 | 0.53 |
| 300 | 0.55 | 0.46 |
| 350 | 0.48 | 0.40 |
| 400 | 0.43 | - |
| 450 | 0.38 | - |

Fuente: Tópicos de Tecnología del Concreto – Ing. Enrique Pasquel C. pag. 176



Tabla 23. Volumen de agregado grueso compactado en seco por metro cubico de concreto.

| | | Volumen de agregado grueso, seco y compactado, por unidad de volumen de concreto, para diversos módulos de fineza del fino (b/br) | | | |
|---|------|---|------|------|------|
| Tamaño máximo nominal del agregado grueso | | 2.40 | 2.60 | 2.80 | 3.00 |
| 3/8" | 0.50 | 0.48 | 0.46 | 0.44 | |
| 1/2" | 0.59 | 0.57 | 0.55 | 0.53 | |
| 3/4" | 0.66 | 0.64 | 0.62 | 0.60 | |
| 1" | 0.71 | 0.69 | 0.67 | 0.65 | |
| 1 1/2" | 0.76 | 0.74 | 0.72 | 0.70 | |
| 2" | 0.78 | 0.76 | 0.74 | 0.72 | |
| 3" | 0.81 | 0.79 | 0.77 | 0.75 | |
| 6" | 0.87 | 0.85 | 0.83 | 0.81 | |

Fuente: *Tópicos de Tecnología del Concreto – Ing. Enrique Pasquel C.* pag. 176

Tabla 24. Pesos específicos de los cementos

| PESO ESPECIFICO DE LOS CEMENTOS (gr/cm3) | |
|---|---------------|
| CEMENTO | P. ESPECIFICO |
| YURA TIPO I | 3.11 |
| YURA TIPO IP | 2.86 |
| YURA TIPO IPM | 2.95 |
| SOL TIPO I | 3.11 |
| ANDINO TIPO I | 3.11 |
| ANDINO TIPO II | 3.18 |
| ANDINO TIPO V | 3.11 |
| ATLAS TIPO IP | 3.03 |

Fuente: *Tópicos de Tecnología del Concreto – Ing. Enrique Pasquel C.* pag. 176



4.4.2.6. Método del comité 211 ACI

CONCEPTOS GENERALES

El comité 211 del ACI ha desarrollado un procedimiento de diseño de mezclas bastante simple el cual, basándose en los cuadros presentados, permite obtener valores de los diferentes materiales que integran la unidad cubica de concreto. El procedimiento para la selección de las proporciones que se presenta es aplicable a concretos de peso normal y a las condiciones que para cada una de las tablas se indican en ellas. Es usual que las características de obra establezcan limitaciones a quien tiene la responsabilidad de diseñar la mezcla. Entre dichas limitaciones pueden estar:

- Relación agua/cemento máximo.
- Contenido mínimo de cemento.
- Contenido máximo de aire.
- Asentamiento.
- Tamaño máximo nominal del agregado grueso.
- Resistencia en compresión mínima.

Requisitos especiales relacionados con la resistencia promedio, o la utilización de tipos especiales de cemento o agregados.

Se debe tener en claro que no existe un método perfecto, ni que nos proporcione una dosificación infalible para solucionar todo los casos prácticos, de todos los métodos de diseños de mezclas se optó en esta tesis por el del Comité 211 del ACI, porque está basado en que los agregados cumplan con los requisitos físicos y granulométricos establecidos por la Norma Internacional ASTM C-33, define el agua de mezcla en función del tamaño máximo del agregado y del Slump Test como medida de trabajabilidad, establece el volumen de agregado grueso compactado en seco en función del tamaño máximo de la piedra y el módulo de fineza de la arena exclusivamente y correlaciona la relación agua/cemento en peso con la resistencia a la compresión, siendo esta una estructura básica, de fácil manejo que se llega a resultados confiables pero no ofrece garantías cuando busquemos concretos sumamente plásticos.

4.4.2.7. Proporcionamiento de los componentes.

4.4.2.7.1. Pasos del método del comité 211 del ACI.

Independientemente que las características finales del concreto sean indicadas en las especificaciones técnicas o dejadas al criterio del profesional responsable del diseño de la mezcla, las cantidades del material por metro cúbico del concreto pueden ser



determinadas, cuando se emplea el Método del Comité 211 del ACI, siendo la secuencia que a continuación se indica:

1. Selección de la resistencia promedio a partir de la resistencia en compresión especificada y la desviación estándar de la compañía constructora.
2. Selección de tamaño máximo nominal del agregado.
3. Selección del asentamiento.
4. Selección de volumen unitario del agua de diseño.
5. Selección del contenido de aire.
6. Selección de la relación agua-cemento por resistencia y por durabilidad.
7. Determinación del factor cemento.
8. Determinación del contenido de agregado grueso.
9. Determinación de la suma de los volúmenes absolutos de cemento, agua de diseño, aire, y agregado grueso.
10. Determinación del volumen absoluto de agregado fino.
11. Determinación del peso seco del agregado fino.
12. Determinación de los valores de diseño del cemento, agua, aire, agregado fino y agregado grueso.
13. Corrección de los valores de diseño por humedad del agregado.
14. Determinación de la proporción en peso de diseño y de obra.
15. Determinación de los pesos por tanda de una bolsa.

4.4.2.7.2. Proporcionamiento de los agregados.

Una vez elaborados las pruebas preliminares con el Método de Diseño de Mezclas del Comité 211 del ACI se realizaron los proporcionamientos finales hasta obtener dosificaciones que se adecuan a las características de las canteras estudiadas y que a continuación mostramos la hoja resumen de diseño de mezclas de las distintas combinaciones tanto para el concreto, en donde se puede observar las propiedades físicas del agregado grueso como del agregado fino, así como el SLUMP de diseño, el SLUMP observado, la relación agua/cemento y las dosificaciones tanto en peso como en volumen.

4.4.3. Diseño de mezcla para la fabricación de viguetas pre esforzadas con agregados de la zona de Cusco.

A continuación, se detalla el diseño de mezcla utilizado para la fabricación de viguetas pre esforzadas con agregado grueso de la cantera de Huandar y agregado fino de la cantera



de Vilcabamba, también se utiliza el aditivo reductor de agua de rango medio Ulmen W-73 (Ver Anexo 7).

Se hicieron ensayos previos en laboratorio elaborando briquetas con diferentes porcentajes de aditivo y relación agua-cemento (A/C), para determinar el porcentaje óptimo en el diseño de mezcla final para la presente investigación.

Resumen de propiedades de los materiales a utilizar para fabricar concreto F'c: 450kg/cm² a 28 días (Tabla 25).

Tabla 25. Resumen de las propiedades de los materiales a utilizar

| | |
|--|--------------------------------|
| Peso específico del agregado fino | 2.647 gr/cm³ |
| Peso específico del agregado grueso | 2.633 gr/cm ³ |
| Peso unitario seco compacto del agregado grueso | 1.631 gr/cm ³ |
| Peso específico del cemento tipo I | 3.15 gr/cm ³ |
| Peso específico del agua | 1 gr/cm ³ |
| Peso específico aditivo Ulmen W-73 | 1.050 gr/cm ³ |
| Dosis recomendada de aditivo Ulmen W-73 | 1.70% |
| Módulo de fineza del agregado fino | 4 |
| Módulo de fineza del agregado grueso | 5.08 |
| Proporción del agregado fino | 65% |
| Proporción del agregado grueso | 35% |
| Porcentaje de humedad del agregado fino | 4.77% |
| Porcentaje de humedad del agregado grueso | 1.11% |
| Porcentaje de absorción del agregado fino | 2.88% |
| Porcentaje de absorción del agregado grueso | 1.02% |
| Slump de diseño | 2" |
| Aire incorporado | 1.50% |



Según la normativa del ACI considera concretos de alta resistencia a partir de 490 kg/cm^2 es por esto que para seguir las tablas de diseño se diseñará el concreto con un margen de 30 kg/cm^2 de error:

$$F'cr = 450 + 40$$
$$F'cr = 490 \text{ kg/cm}^2$$

Determinación de la relación agua cemento (A/C) con ayuda de la Tabla 26 del ACI.

Tabla 26. Relación agua/cemento por resistencia.

| F'c (kg/cm ²) | Relación agua cemento en peso | |
|------------------------------|--------------------------------------|-----------------------------------|
| | Concretos sin aire incorporado | Concretos con aire incorporado |
| 150 | 0.80 | 0.70 |
| 200 | 0.70 | 0.61 |
| 250 | 0.62 | 0.53 |
| 300 | 0.55 | 0.46 |
| 350 | 0.48 | 0.40 |
| 400 | 0.43 | - |
| 450 | 0.38 | - |

Fuente: ACI – Comité 211.

Extrapolando se tiene:

$$\frac{490 - 450}{490 - 400} = \frac{x - 0.38}{x - 0.43}$$

$$x = 0.35$$

Entonces nuestra relación agua cemento (A/C) es **0.35**.

Utilizando la Tabla 27 se calcula el volumen de agua para luego calcular el volumen de cemento.



Tabla 27. Requisitos aproximados de agua de mezclado y contenido de aire para diferentes revestimientos y tamaños nominales de agregado.

| AGUA, Kg/m ³ CONCRETO PARA TMG | | | | | | | | |
|---|------|-------|-------|-------|-------|-------|-------|--------|
| Revestimiento (cm) | 9.50 | 12.50 | 19.00 | 25.00 | 38.00 | 50.00 | 75.00 | 150.00 |
| concreto sin aire incluido | | | | | | | | |
| De 2.5 a 5.0 | 207 | 199 | 190 | 179 | 166 | 154 | 130 | 113 |
| De 7.5 a 10 | 228 | 216 | 205 | 193 | 181 | 169 | 145 | 124 |
| De 15 a 17.5 | 243 | 228 | 216 | 202 | 190 | 178 | 160 | - |
| Cantidad aprox. Aire atrapado | 3.00 | 2.50 | 2.00 | 1.50 | 1.00 | 0.50 | 0.30 | 0.20 |
| concreto sin aire incluido | | | | | | | | |
| De 2.5 a 5.0 | 181 | 175 | 168 | 160 | 150 | 142 | 122 | 107 |
| De 7.5 a 10 | 202 | 193 | 184 | 175 | 165 | 157 | 133 | 119 |
| De 15 a 17.5 | 216 | 205 | 197 | 174 | 174 | 166 | 154 | - |

Fuente: ACI – Comité 211.

Con un tamaño máximo nominal de 1" y Slump de 2" tenemos que la cantidad de agua es 158 L/m³.

Entonces la cantidad de cemento será:

$$\frac{158}{C} = 0.35$$

$$C = 450 \text{ kg}$$

- Ahora se calcula el volumen de agregado grueso que se necesita con la Tabla 28.



Tabla 28. Peso del agregado grueso por unidad de volumen de concreto.

| Volumen de agregado grueso, seco y compactado, por unidad de volumen de concreto, para diversos módulos de fineza del fino (b/br) | | | | |
|---|------|------|------|------|
| Tamaño máximo nominal del agregado grueso | 2.40 | 2.60 | 2.80 | 3.00 |
| 3/8" | 0.50 | 0.48 | 0.46 | 0.44 |
| 1/2" | 0.59 | 0.57 | 0.55 | 0.53 |
| 3/4" | 0.66 | 0.64 | 0.62 | 0.60 |
| 1" | 0.71 | 0.69 | 0.67 | 0.65 |
| 1 1/2" | 0.76 | 0.74 | 0.72 | 0.70 |
| 2" | 0.78 | 0.76 | 0.74 | 0.72 |
| 3" | 0.81 | 0.79 | 0.77 | 0.75 |
| 6" | 0.87 | 0.85 | 0.83 | 0.81 |

Fuente: ACI – Comité 211.

El módulo de fineza del agregado grueso es 5.08 y extrapolando tenemos:

$$\frac{5.08 - 3}{5.08 - 2.8} = \frac{x - 0.6}{x - 0.62}$$
$$x = 0.38$$

Entonces el peso de agregado grueso será:

$$G = 0.38 * 1631$$

$$G = 624 \text{ kg.}$$

- Se determina el volumen del agregado fino restante, se suma los volúmenes de agua, cemento y agregado grueso y se resta de 1m³ de diseño:

$$\text{Cemento} = \frac{450 \text{ kg}}{3150 \text{ kg/m}^3}$$

$$\text{Cemento} = 0.1429 \text{ m}^3$$



$$Agua = \frac{1575 \text{ kg}}{1000 \text{ kg/m}^3}$$

$$Agua = 0.1575 \text{ m}^3$$

$$AG = \frac{624 \text{ kg}}{2633 \text{ kg/m}^3}$$

$$AG = 0.237 \text{ m}^3$$

$$Aire incorporado = 0.015 \text{ m}^3$$

$$Aditivo = \frac{0.017 * 450 \text{ kg}}{1050 \text{ kg/m}^3}$$

$$Aditivo = 0.0073 \text{ m}^3$$

$$AF = 1 - 0.015 - 0.237 - 0.158 - 0.1429 - 0.0073$$

$$AF = 0.4397 \text{ m}^3$$

$$AF = 0.4397 \text{ m}^3 * 2647 \text{ kg/m}^3$$

$$AF = 1163.88 \text{ kg.}$$

- En resumen, se tiene:

Tabla 29. Resumen del diseño.

| Materiales | P.E (kg/m3) | Volumen (m3) | Diseño s.s.s para 1m3 | |
|--------------|-------------|--------------|-----------------------|----|
| Cemento | 3150.000 | 0.1429 | 450.000 | kg |
| Agua | 1000.000 | 0.1580 | 158.000 | kg |
| AF | 2646.910 | 0.4397 | 1163.886 | kg |
| AG | 2632.790 | 0.2371 | 624.170 | kg |
| W-73 | 1050.000 | 0.0073 | 7.650 | kg |
| Aire | 1.000 | 0.0150 | 1.500 | % |
| Total | | 1.0000 | 2405.206 | kg |



➤ Corrección por absorción

$$AF = 1163.88 / 1.0288 \text{ kg} = 1131.297 \text{ kg}$$

$$AG = 624.17 / 1.0102 \text{ kg} = 617.868 \text{ kg}$$

➤ Corrección por humedad

$$AF = 1131.297 * 1.0477 \text{ kg} = 1185.260 \text{ kg}$$

$$AG = 617.868 * 1.0111 \text{ kg} = 624.726 \text{ kg}$$

Entonces:

$$AF = 1185.260 - 1163.886 = 21.374 \text{ kg}$$

$$AG = 624.726 - 624.170 = 0.556 \text{ kg}$$

Tabla 30. Resumen general del diseño corregido.

| Materiales | P.E (kg/m ³) | Volumen (m ³) | Diseño seco para 1m ³ | Diseño s.s.s para 1m ³ | Correc. por humed. | Diseño correg. para 1m ³ | Diseño corregido para viguetas (0.360 m ³) |
|------------|-----------------------------|------------------------------|-------------------------------------|--------------------------------------|--------------------------|---|--|
| Cemento | 3150.000 | 0.143 | 450.000 | kg | 450.000 | kg | |
| Agua | 1000.000 | 0.158 | 158.000 | L | 158.000 | kg | 136.070 |
| Arena | 2646.919 | 0.440 | 1131.297 | kg | 1163.886 | kg | 21.374 |
| Piedra | 2632.796 | 0.237 | 617.868 | kg | 624.170 | kg | 0.556 |
| W-73 | 1050.000 | 0.007 | 7.650 | kg | 7.650 | kg | 7.650 |
| Aire | 1.000 | 0.015 | 1.500 | % | 1.500 | % | 1.500 |
| Total | | 1.000 | 2366.315 | kg | 2405.206 | kg | 2405.206 |
| | | | | | | | 865.874 |
| | | | | | | | kg |

4.5. ENSAYOS DEL CONCRETO

4.5.1. Resistencia a la compresión axial del concreto de diseño

Teniendo en cuenta el diseño planteado siguiente:



Tabla 31. Resumen de diseño de mezcla según el método ACI .

| Materiales | P.E (kg/m ³) | Volumen (m ³) | Diseño correg. para 1m ³ | | Diseño corregido para viguetas (0.360 m ³) | |
|----------------|-----------------------------|------------------------------|---|--|--|--|
| | | | correg. para 1m ³ | corregido para viguetas (0.360 m ³) | corregido para viguetas (0.360 m ³) | corregido para viguetas (0.360 m ³) |
| Cemento | 3150.000 | 0.143 | 450.000 | kg | 162.000 | kg |
| Agua | 1000.000 | 0.158 | 136.070 | L | 48.985 | kg |
| Arena | 2646.919 | 0.440 | 1185.260 | kg | 426.694 | kg |
| Piedra | 2632.796 | 0.237 | 624.726 | kg | 224.901 | kg |
| W-73 | 1050.000 | 0.007 | 7.650 | kg | 2.754 | gr. |
| Aire | 1.000 | 0.015 | 1.500 | % | 0.540 | % |
| Total | | 1.000 | 2405.206 | kg | 865.874 | kg |

Para validar este diseño de mezcla, se realizaron treinta testigos cilíndricos de concreto, los cuales fueron ensayados a los veintiocho días de edad, analizando su resistencia a la compresión axial y la desviación estándar que presenten, con fines estadísticos (ACI 3. , págs. 68-83).

Los resultados del ensayo para determinar la compresión axial de los testigos cilíndricos de concreto se obtuvieron mediante la aplicación del método recomendado en la norma NTP.339.034. HORMIGÓN (CONCRETO): “Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas” y el ACI 318S-05 “Requisitos del reglamento para concreto estructural”. Estos resultados pueden observarse en la Tabla 32.



Tabla 32. Ensayo de testigos cilíndricos de concreto a la edad de 28 días.

| Muestra | Peso (kg) | Diámetro promedio (cm) | Altura (cm) | Resistencia (kg) | Área en (cm ²) | Resistencia (kg/cm ²) | % |
|---------|-----------|------------------------|-------------|------------------|----------------------------|-----------------------------------|--------|
| 1 | 4.015 | 10.125 | 20.15 | 41585.5 | 80.52 | 516.46 | 105.40 |
| 2 | 4.05 | 10.075 | 20.05 | 39892.7 | 79.72 | 500.41 | 102.12 |
| 3 | 3.996 | 10.1 | 20.3 | 40588.9 | 80.12 | 506.6 | 103.39 |
| 4 | 4.05 | 10.075 | 20.1 | 39568.6 | 79.72 | 496.34 | 101.29 |
| 5 | 4.048 | 10.1 | 20.2 | 40947.5 | 80.12 | 511.08 | 104.30 |
| 6 | 3.998 | 10.075 | 20 | 39542.7 | 79.72 | 496.02 | 101.23 |
| 7 | 4.054 | 10.05 | 20.1 | 39621.2 | 79.33 | 499.45 | 101.93 |
| 8 | 3.992 | 10.125 | 20.15 | 41015.4 | 80.52 | 509.38 | 103.96 |
| 9 | 4.018 | 10.175 | 20.05 | 40423.9 | 81.31 | 497.16 | 101.46 |
| 10 | 4.125 | 10.175 | 20.15 | 41002.5 | 81.31 | 504.27 | 102.91 |
| 11 | 4.107 | 10.125 | 20.1 | 40256.8 | 80.52 | 499.96 | 102.03 |
| 12 | 4.110 | 10.1 | 20 | 39568 | 80.12 | 493.86 | 100.79 |
| 13 | 4.155 | 10.05 | 20.05 | 39098.8 | 79.33 | 492.86 | 100.58 |
| 14 | 4.038 | 10.1 | 20.1 | 40215.1 | 80.12 | 501.94 | 102.44 |
| 15 | 4.015 | 10.075 | 20 | 39650.2 | 79.72 | 497.37 | 101.50 |
| 16 | 4.12 | 10.15 | 20.05 | 40515.2 | 80.91 | 500.74 | 102.19 |
| 17 | 4.025 | 10.1 | 20.1 | 41115.5 | 80.12 | 513.17 | 104.73 |
| 18 | 4.03 | 10.1 | 20.15 | 39925.1 | 80.12 | 498.32 | 101.7 |
| 19 | 4.025 | 10.2 | 20.2 | 40425.6 | 81.71 | 494.74 | 100.97 |
| 20 | 4.000 | 10.075 | 20.1 | 39192.7 | 79.72 | 491.63 | 100.33 |
| 21 | 3.998 | 10.05 | 20.15 | 39741.5 | 79.33 | 500.96 | 102.24 |
| 22 | 3.995 | 10.125 | 20 | 41175.1 | 80.52 | 511.36 | 104.36 |
| 23 | 3.997 | 10.075 | 20.05 | 39785.5 | 79.72 | 499.07 | 101.85 |
| 24 | 3.994 | 10.15 | 20.1 | 41000.2 | 80.91 | 506.74 | 103.42 |
| 25 | 4.052 | 10.125 | 20.15 | 40852.8 | 80.52 | 507.36 | 103.54 |
| 26 | 4.005 | 10.075 | 20.2 | 39192.7 | 79.72 | 491.63 | 100.33 |
| 27 | 4.085 | 10.125 | 20.2 | 41401.5 | 80.52 | 514.18 | 104.93 |
| 28 | 3.994 | 10.1 | 20.15 | 40365.2 | 80.12 | 503.81 | 102.82 |
| 29 | 4.000 | 10.1 | 20.15 | 39914.5 | 80.12 | 498.18 | 101.67 |
| 30 | 4.018 | 10.1 | 20.1 | 39954.7 | 80.12 | 498.69 | 101.77 |

Adicionalmente se obtuvieron quince briquetas del mismo diseño para ensayarlas a compresión axial a los tres días de fabricación ya que ese fue el tiempo estimado para



destensar el acero y transferir las fuerzas de tensado al concreto. Los resultados se muestran en la Tabla 33.

Tabla 33. Ensayo de testigos cilíndricos de concreto a la edad de 3 días.

| Muestra | Peso (kg) | Diámetro promedio (cm) | Altura (cm) | Resistencia (Kg) | Área en (cm ²) | Resistencia (kg/cm ²) |
|---------|-----------|------------------------|-------------|------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 4.107 | 10.125 | 20.1 | 28430.6 | 80.52 | 353.09 |
| 2 | 4.125 | 10.175 | 20.15 | 29512.1 | 81.31 | 362.96 |
| 3 | 4.018 | 10.175 | 20.05 | 28741.3 | 81.31 | 353.48 |
| 4 | 3.992 | 10.125 | 20.15 | 29749.5 | 80.52 | 369.47 |
| 5 | 4.015 | 10.075 | 20 | 28971.8 | 79.72 | 363.42 |
| 6 | 4.038 | 10.1 | 20.1 | 29102.5 | 80.12 | 363.24 |
| 7 | 4.054 | 10.05 | 20.1 | 28612.6 | 79.33 | 360.68 |
| 8 | 4.05 | 10.075 | 20.05 | 28502.1 | 79.72 | 357.53 |
| 9 | 3.996 | 10.1 | 20.3 | 28778.6 | 80.12 | 359.19 |
| 10 | 4.05 | 10.075 | 20.1 | 28354.3 | 79.72 | 355.67 |
| 11 | 4.155 | 10.05 | 20.05 | 28789.7 | 79.33 | 362.91 |
| 12 | 3.998 | 10.075 | 20 | 28800.5 | 79.72 | 361.27 |
| 13 | 4.015 | 10.125 | 20.15 | 28798.9 | 80.52 | 357.66 |
| 14 | 4.11 | 10.1 | 20 | 29201.4 | 80.12 | 364.47 |
| 15 | 4.048 | 10.1 | 20.2 | 28789.5 | 80.12 | 359.33 |

Según el diseño de viguetas pre esforzadas planteado, la resistencia del concreto a la cual se debe transferir las cargas de pre esforzado del acero al concreto es de 350 kg/cm², el resultado de este ensayo nos permite desenocofrar y liberar los alambres de alta resistencia de las viguetas a los tres días de edad.

4.6. ACERO DE ALTA RESISTENCIA

4.6.1. Ensayo de tracción directa a varillas de acero (límite de fluencia)

En el presente capítulo, se muestran los resultados obtenidos de ensayos realizados sobre los alambres de acero que se utilizarán en la elaboración de las viguetas pre esforzadas. Los ensayos realizados corresponden a tracción universal de los alambres de alta resistencia hasta cargas de rotura.



Los ensayos de tracción de los alambres de acero están basados en la norma ASTM A881 y ASTM A421, que fueron realizados en la Maquina Universal del Laboratorio de Mecánica de Suelos, de la escuela profesional de Ingeniería Civil de la Universidad Nacional San Antonio Abad del Cusco. El objetivo de las pruebas fue determinar las propiedades mecánicas del alambre de alta resistencia.



Figura 35. Ensayo a tracción de los alambres de alta resistencia.

Se trata de muestras de alambres de acero de alta resistencia, para su uso como tendones de pre esforzado. Estos alambres poseen una estructura monolítica, con un dentado de tipo helicoidal para generar superficie de adherencia con el concreto, de tipo corrugado. Se presentan para el presente estudio muestras de diámetro nominal de 4.2mm (Ver Figura 35). De estas se obtuvieron 4 muestras, de longitud variable. El peso promedio de cada muestra fue de 109 gr., este acero es fabricado por la empresa brasileña ArcelorMittal. Las muestras presentan una sección constante sin resaltes ni reducciones locales.



Se realizaron ensayos sobre los elementos en estudio, con el objeto de determinar propiedades que sean de interés. En particular los ensayos realizados corresponden a la tracción directa de varillas de refuerzo para viguetas pre esforzadas.

Las muestras del alambre para el pre esfuerzo, son ensayadas en la maquina universal, mediante el uso de la prensa hidráulica de tracción. La aplicación de la carga se realiza en forma constante creciente y durante el ensayo se mide la deformación axial. (Ver Anexo 3).

Los datos obtenidos (Ver anexo 3), dan como curvas de esfuerzo- deformación, como la que se ve en los gráficos siguientes.

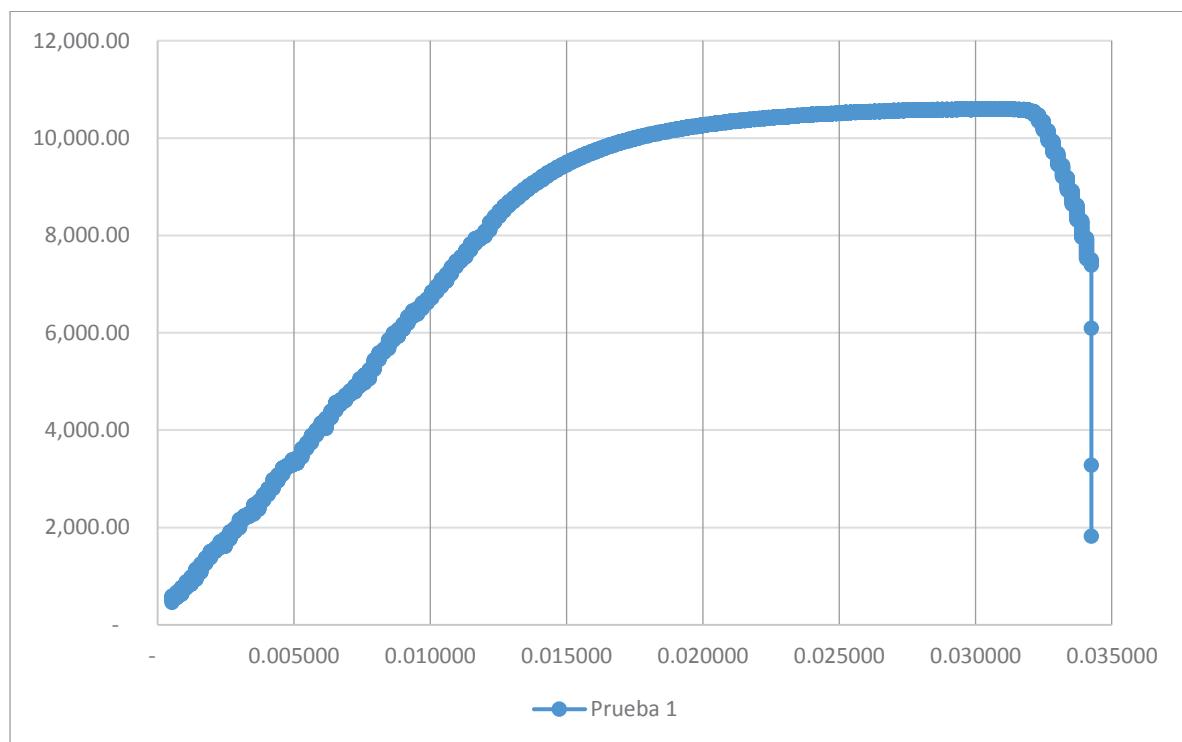


Gráfico 7. Curva esfuerzo deformación de la P. Nro. 1

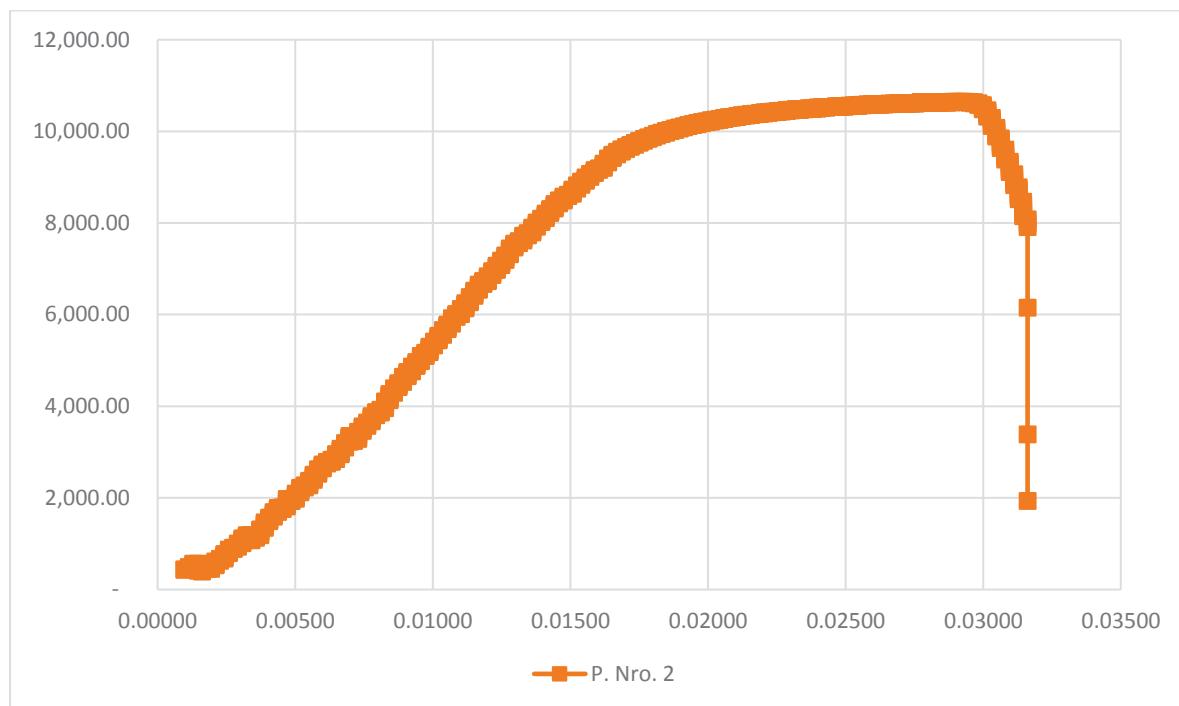


Gráfico 8. Curva esfuerzo- deformación de la P. Nro. 2.

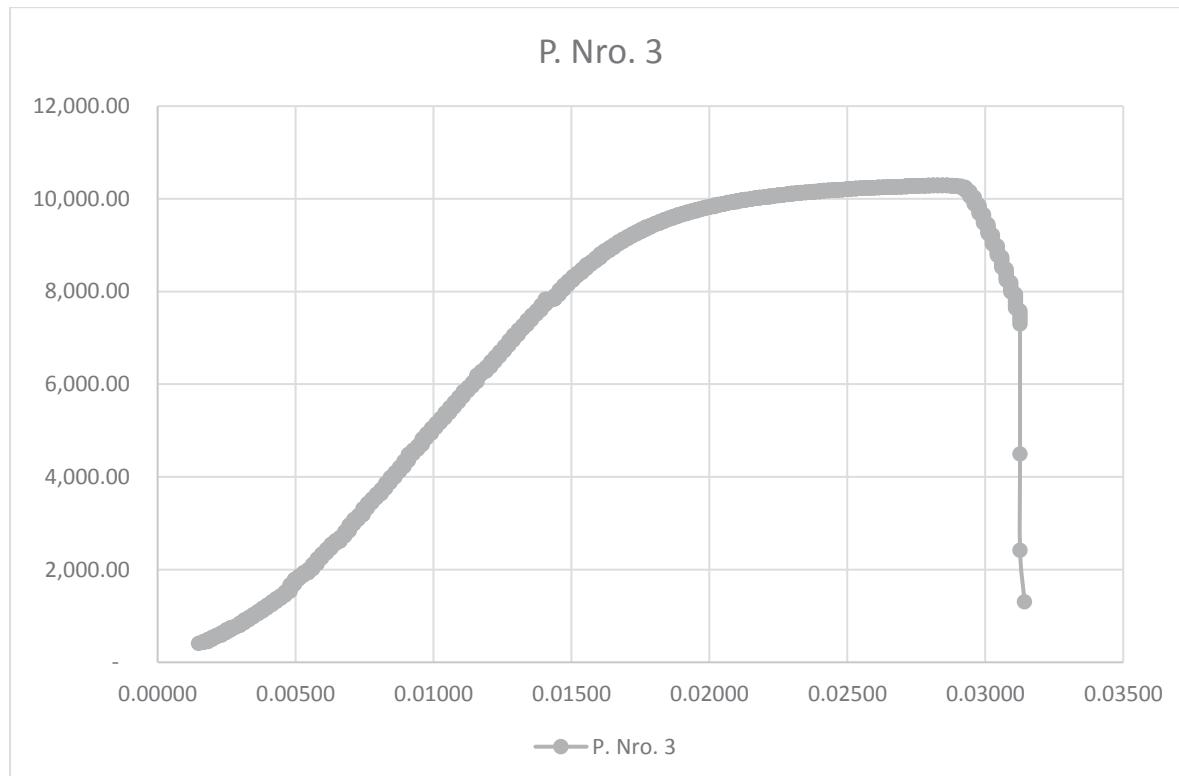


Gráfico 9. Curva esfuerzo-deformación de la P. Nro. 3.

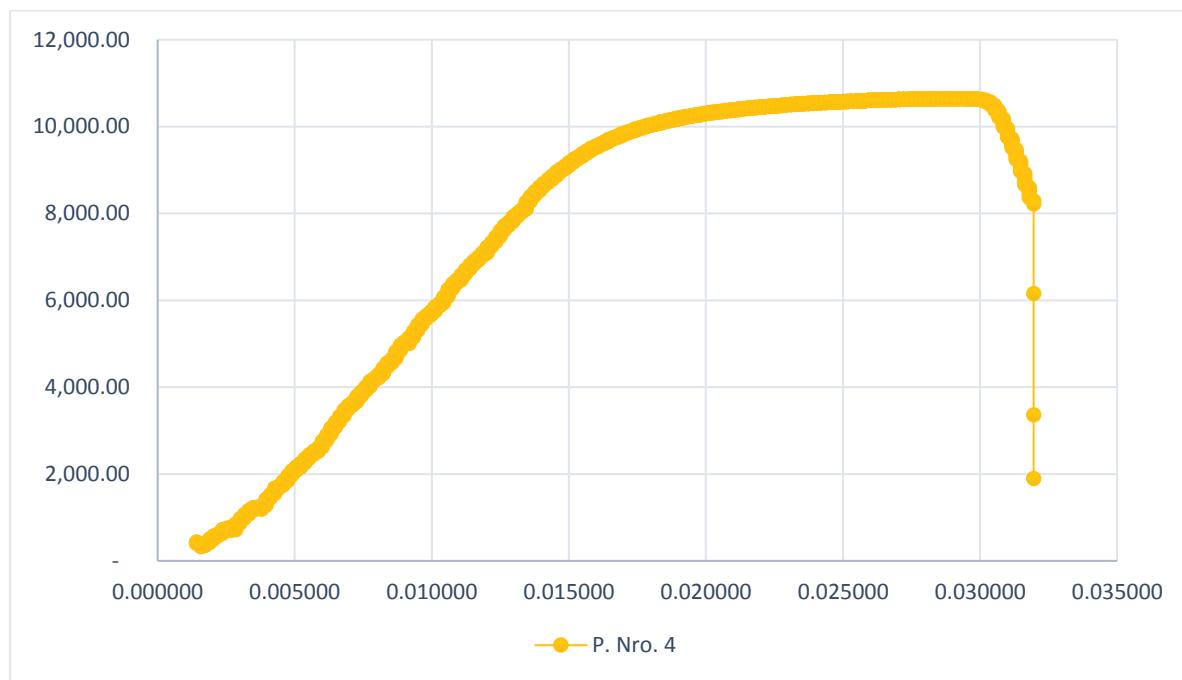


Gráfico 10. Curva esfuerzo-deformación de la P. Nro. 4.

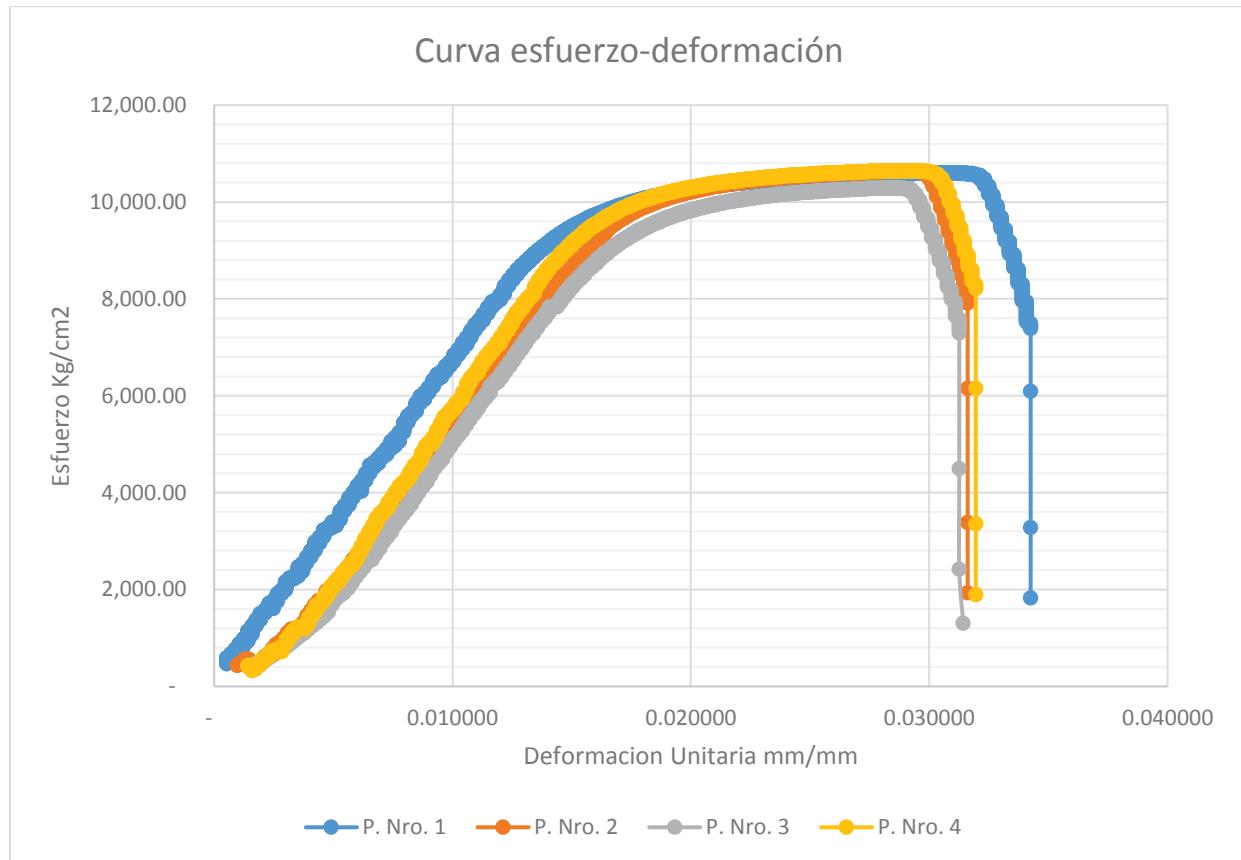


Gráfico 11. Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas realizadas



De las curvas esfuerzo- deformación unitaria, se obtiene las propiedades mecánicas que se observa en la Tabla 34, donde se encuentra el promedio de cada propiedad mecánica, y los que son usados en los distintos cálculos que se realizaron en los capítulos anteriores.

Tabla 34. Pruebas de acero

| Muestra | Resistencia a la tracción máxima (Kgf) | Tensión de Rotura (Kg/cm ²) | Máxima Deformación unitaria (mm/mm) |
|------------|--|--|--|
| P. Nro. 01 | 1,331.00 | 10,591.76 | 0.03426 |
| P. Nro. 02 | 1,337.00 | 10,639.51 | 0.03161 |
| P. Nro. 03 | 1,293.00 | 10,289.37 | 0.03143 |
| P. Nro. 04 | 1,337.00 | 10,639.51 | 0.03195 |



CAPÍTULO V

5. MAQUINAS Y HERRAMIENTAS

Para la elaboración de viguetas pre esforzadas se necesitan máquinas y herramientas indispensables. Dado que este trabajo de investigación tiene como uno de sus objetivos la elaboración de viguetas pre esforzadas, se acondicionó la tecnología de nuestra ciudad para hacerla viable y a continuación se detalla el funcionamiento de la máquina y herramientas utilizadas, así como también las máquinas y herramientas que se deberían utilizar.

5.1.1. Moldes de acero.

Existen diferentes tipos de moldes para la fabricación de viguetas pre esforzadas ya que las formas y longitudes son variables entre fabricantes, los materiales con los cuales se fabrican también son variados, por lo general se utilizan planchas de acero de diferentes espesores las cuales son dobladas convenientemente para obtener la forma de la viga de diseño, estas son unidas por soldadura para mayor comodidad en el proceso de pretensado del acero y colocación de guías por donde pasará el acero de alta resistencia.

Estos moldes de acero, son indispensables para la elaboración de viguetas de manera artesanal, existen otros métodos para dar forma a las viguetas, como es el caso de la elaboración industrial, el cual utilizan maquinas moldeadoras o extrusoras.

Este tipo de máquinas ayuda en la elaboración sin necesidad de moldes. El costo de esta máquina para moldeado es elevado en comparación a los moldes de acero.

A continuación, se muestra las características de dos tipos de máquinas para la elaboración de viguetas pre esforzadas.

➤ Tensyland Standard

Fabricación de viguetas pretensadas simple y doble T

Máquina TENSYLAND especialmente diseñada para la fabricación de viguetas pretensadas simple T y doble.



Figura 36. Maquina Tensyland

Fuente: (TENSYLAND, s.f.)

Características técnicas

- Fabricación máxima de 220mm de altura.
- Funcionamiento con 1 vibrador, sin sobre-tolva.

➤ **Tensyland EV-5 T-20**



Figura 37. Maquina extrusora Tensyland

Fuente: (TENSYLAND, s.f.)



Características técnicas

- Equipo para la fabricación de grandes cantidades de producto a la vez.
- Versatilidad en productos hasta 300mm de altura.
- Fabricación de 20 viguetas pretensadas simultáneamente o de placas de 2,40m.
- Funcionamiento por 4 vibradores con regulación electrónica.

En comparación, los moldes utilizados para la elaboración de viguetas pre esforzadas fueron hechos de planchas de acero de 2.40m x 1.20m x 2mm de espesor (Planchas delgadas LAC) norma técnica ASTM A36, cuyo fabricante es la empresa Aceros Arequipa, las cuales fueron cortadas y dobladas en la forma y dimensiones adoptadas para las viguetas pre esforzadas.

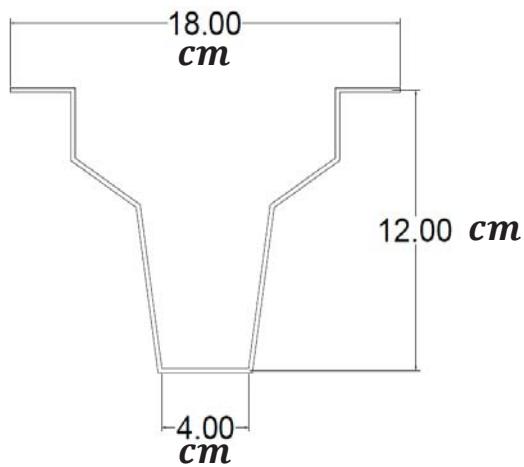


Figura 38. Molde de la sección de la viguela pre esforzada.



Figura 39. Doblado del molde



La longitud y la cantidad de moldes a fabricar se determinaron bajo los siguientes criterios.

- Nueve metros de longitud: Cada vigueta pre esforzada fue diseñada para una longitud de cuatro metros, cortando una vigueta de nueve metros a la mitad tenemos dos de 4.5 metros, para la instalación y anclaje en las vigas principales de la estructura donde irán apoyadas se libera 0.25m de concreto de cada extremo, quedando 4 metros de luz independiente fuera de las longitudes de anclaje en cada extremo. (Pretensa, s.f.).

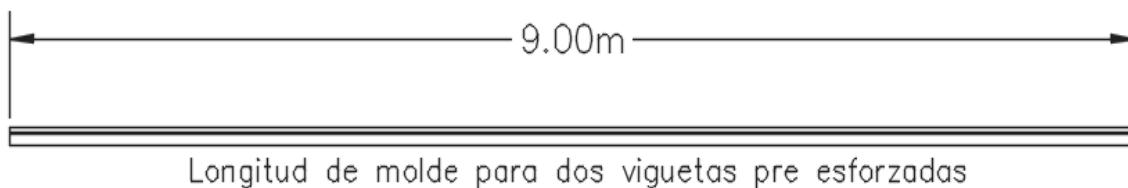


Figura 40. Longitud del molde.



Figura 41. Longitud de vigueta pre esforzada.

- Tres moldes: Se fabricaron tres moldes debido a que solo esta es solo una etapa experimental y no se fabricará este producto a gran escala o industrialmente, en el caso se opte por abrir una planta para la fabricación de viguetas pre esforzadas con agregados de la zona de Cusco se pueden aumentar la cantidad de moldes y así masificar la producción.

5.1.2. Máquina para pretensar acero.

En la ciudad de Cusco no existen máquinas para pretensar o postensar acero. La empresa fabricante de máquinas pre tensoras líder en el mundo es “PAUL equipos de pretensado y postensado de concreto” (PAUL, s.f.) Con sede en Alemania, la cual posee una tienda de ventas en la ciudad de Mérida en México. De acuerdo a la cotización que se obtuvo, adquirir esta máquina costaría \$19 344.00 (Ver anexo 6) lo cual no es rentable en esta etapa que es una fase experimental y estudio de factibilidad.



Figura 42. Minigato hidráulico de 10cm de carrera para pretensado.

Fuente: (PAUL, s.f.)

Las características de esta máquina son las siguientes:

MINI GATO HIDRÁULICO de 60 kN

Minigato Hidráulico de botella con carrera de 100mm, con cabeza de soporte para tensar alambre de 5mm. Número de Parte: 72-026.00

BOMBA DE ALTA PRESIÓN NG30 de 300 BARS:

- Motor eléctrico 1.5KW, 220 V. 60 Hz Trifásico.
- Equipo con ruedas para facilitar su traslado.
- Bomba de 3 litros por minuto
- Filtro para aceite.
- Manómetro de 0 a 300 bars con diámetro de 100 mm.
- Manguera de 2.5 m. Número de Parte: 77-231.10

KIT DE HERRAMIENTAS Y LIMPIEZA COMPUESTO POR:

- Destensionador para barrilete ABIERTO A24-16
- Botador de mordaza con manguito
- Cepillo recto para limpieza de mordaza de 5mm
- Cepillo cónico para limpieza de barrilete
- Lata de spray de grasa de molibdeno para limpieza de mordazas y barriletes.



El lugar más cercano donde se podría conseguir una máquina artesanal no tan sofisticada es Argentina con la empresa **VITUS BRAIG E HIJOS S.A.** ubicada en la ciudad de Chubut (Braig, s.f.).



Figura 43. Maquina VITUS BRAIG para para pretensar acero (Braig, s.f.)

Las características de esta máquina son las siguientes:

VITUS BRAIG (PLANTA PODER)

Motor: Eléctrico blindado normalizado de potencia 4HP a 1400rpm.

Bomba: Hidráulica radial de 7(siete) pistones con un caudal de 5.4 lts/min y una presión de trabajo de 420kg/cm².

Depósito de Aceite Hidráulico: Permite trabajar en forma continua y en condiciones de alta temperatura ambiente. Capacidad mínima 60 litros y capacidad máxima 90 litros.

Gabinete: Construido en chapa de acero, tanque de aceite incorporado descapotable para permitir el acceso del circuito hidráulico y eléctrico, provisto de tres ruedas, dos de gran diámetro de trocha fija y una más pequeña direccional, lo que la gran movilidad lo hace apto para operar en cualquier terreno.

Tablero Eléctrico: Compuesto de contactores electromagnéticos con relevo térmico de sobrecarga para el motor y contactores de accionamiento selectivo de las válvulas electromagnéticas de avance y retorno. Comando por botonera con tensión de seguridad 24 Volt.

Circuito Hidráulico: Las válvulas están compuestas de: 2 de presión escalonada, 1 de presión máxima de 420kg/cm², 1 de presión limitada a 200kg/cm², 1 de seguridad de 75kg/cm², 1 reguladora de presión de 0 a 420kg/cm² y 3 de retención; todas montadas en



un block compacto con circuitos internos interconectados. El resto del circuito de alta presión construido con caño especial sin costura. Los circuitos de retorno o de baja presión son de caño flexible y conducen el líquido hidráulico al depósito pasando previamente por un cuadrante compuesto de 7 tubos transparentes con los cuales se constata el correcto funcionamiento de la máquina, en función de visualización de los distintos flujos coincidiendo con el ciclo que esté realizando, detectando fallas preventivamente.

Filtro: La máquina está equipada con un filtro microporoso del tipo a cartucho desechable, incorporado en el circuito, especial para retener impurezas y agua.

Manómetro: A los efectos de controlar las cargas de tensado del equipo, lleva en el frente un manómetro de alta presión de diámetro Ø150mm con escala graduada de 0 a 600kg/cm². Además, en los laterales del block hidráulico, existen dos salidas para acoplar un manómetro a cada lado y que en determinado momento sirven como verificación de la presión de bomba y tensado.

Zócalo de acople hidráulico: En el frente del equipo se halla un zócalo, al cual se conectan las cabezas de tensado interconectándose automáticamente los cuatro circuitos hidráulicos y los tres eléctricos.

Dimensiones generales del equipo: Largo 900mm, ancho 650mm y alto 1000mm.

Dimensiones brutas del cajón de embalaje: 1200 x 1170 x 850mm.

Peso neto del equipo: Aproximado sin aceite 268kg.

Es por esta razón que se pensó en transformar la fuerza rotatoria de un motor a una fuerza de tracción con el uso de poleas y ganchos, el sistema de funcionamiento de esta máquina se describe a continuación:

La máquina artesanal para pre esforzar acero que se ideo, consta de un motor eléctrico de 2.5 HPs controlado por un tablero electrónico, posee un regulador de velocidades y un freno, en la parte delantera posee dos perfiles circulares los cuales sirven de apoyo entre la máquina y los muelles de anclaje, finalmente para evitar que la maquina se eleve por el momento de fuerza que se origina al pretensar el acero se coloca una grapa que la sujetta al piso en la parte posterior.



Figura 44. Maquina artesanal para pretensar acero.

El motor hace girar el tambor sobre el cual se enrolla acero trenzado de $\frac{1}{4}$ de pulgada previamente conectado a una polea. Dicha polea transmite la fuerza mediante una cadena hacia un par de abrazaderas las cuales sirven como mecanismo de sujeción entre la maquina pretensora y el alambre de alta resistencia.

Una vez accionado el motor el cable trenzado se enrolla en el tambor y la polea tira hacia atrás al transmisor de fuerza, el mecanismo de sujeción muerde el alambre de alta resistencia aplicándole la fuerza de pretensado.

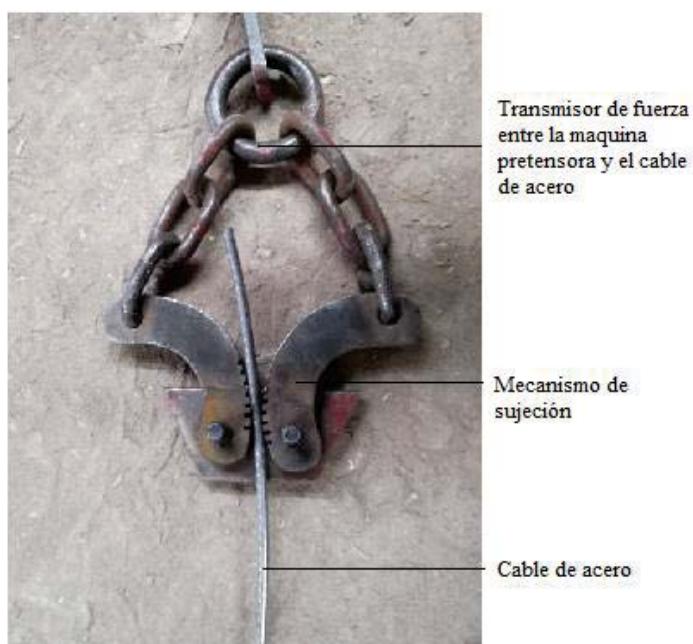


Figura 45. Mecanismo de sujeción entre la máquina y el alambre de alta resistencia.



La fuerza aplicada se mide mediante la deformación del alambre de alta resistencia.

5.1.3. Cuñas y anclajes.

5.1.3.1. Cuñas.

Las cuñas son usadas en el pre esfuerzo en dos formas, como la sujeción fija y como la sujeción móvil.

- Sujeción móvil.

Cuñas para pretensado y postensado, para todas las medidas de cable, torón o alambre de pre esfuerzo, son anclajes empleados con más frecuencia para alambres de tensar estirados en frío, lisos y perfilados, en su mayoría de dos partes.

A continuación, se muestra imágenes de cuñas usadas como sujeción móvil o fija.



Figura 46. Cuñas para pretensado y postensado

Estas cuñas, se clasifican de acuerdo al diámetro del acero que se va a pre esforzar, las medidas más comunes son las siguientes:

- Cuña T-16 pretensado 3mm.
- Cuña T-16 pretensado 4mm.
- Cuña T-16 pretensado 4.5mm.
- Cuña T-16 pretensado 5mm.
- Cuña T-16 pretensado 6mm.
- Cuña T-16 pretensado 7mm.
- Cuña T-16 pretensado 5/16".
- Cuña T-16 pretensado 2*2 (3.6-3.8mm).



- Cuña T-16 pretensado 5.3mm.
- Cuña T-16 pretensado 4.6mm-4.9mm.

Para el desarrollo del tema de investigación, se vio por conveniente el uso de sistemas de sujeción fija y móvil, de manera artesanal, debido a que las cuñas mostradas anteriormente, no están disponibles en nuestro medio.

❖ **Sujeción móvil.**

La sujeción móvil para el extremo móvil el cual se encuentra más cerca de la máquina para pre esforzar, se utilizó el siguiente seguro, es una cuña de forma rectangular que cuenta con un pasador por donde se coloca el alambre de alta resistencia, una vez colocado se pre esfuerza el alambre y cuando se tiene la fuerza correcta de pre esforzado, se cierra el seguro ovalado dentado que no permite el retorno del alambre de alta resistencia.

Debido a la fuerza del pre esfuerzo, la cuña debía soportar desgaste en los dientes, para lo cual se vio por conveniente usar acero de muelle, debido a que es más resistente al desgaste.

Las dimensiones de la cuña son de 50mm alto x 50mm ancho y 7mm espesor, el seguro ovalado dentado, tiene un espesor de 5mm.



Figura 47. Sujeción móvil artesanal.

❖ **Sujeción fija.**

El mecanismo escogido para la sujeción fija que se ubica en el extremo inicial fueron candados sujetadores de acero de media pulgada, tal como se muestra a continuación, se colocaron haciendo un doblez con el acero y se puso una varilla de acero para hacerle traba.



Figura 48. Sujeción fija (Candado de acero).

5.1.3.2. Anclaje.

Los anclajes utilizados para la fabricación de viguetas pre esforzados fueron perfiles H de 20x18x5 los cuales se anclaron al piso de trabajo con ayuda varillas de acero de $\frac{3}{4}$ de pulgada enterradas 20cm. A estos anclajes se les hicieron perforaciones (Guías) siguiendo la distribución del acero en las viguetas.



Figura 49. Anclajes (Perfiles H).

Los anclajes usados, son los encargados de absorber en gran medida la fuerza de pre esfuerzo para luego esta fuerza ser transmitida a la viga. Las guías se realizaron de acuerdo a las dimensiones de las viguetas y la distribución de los moldes como se muestra.

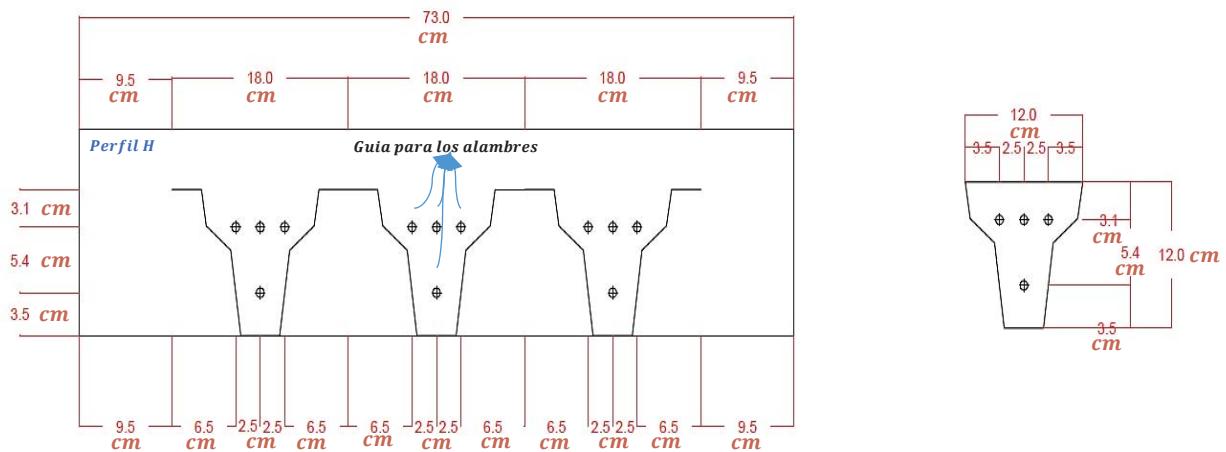


Figura 50. Distribución de las guías y los moldes en los anclajes.



CAPÍTULO VI

6. DISEÑO DE VIGUETAS PRE ESFORZADAS (MEMORIA DE CÁLCULO).

6.1. Propiedades de la viga

6.1.1. Propiedades del concreto

Las propiedades del concreto, que se utilizaran para el diseño y la construcción, son las que se muestran a continuación.

- Resistencia del concreto de la viga: $f'c = 490 \text{ Kg/cm}^2$.
- Resistencia del concreto de la losa: $f'cl = 210 \text{ Kg/cm}^2$.
- Días transcurridos para la transferencia: **3 días**.
- Resistencia del concreto en la transferencia: $f'ci = 350 \text{ Kg/cm}^2$.
- $Ec = 15,000 * \sqrt{480} = 328,633.53 \text{ Kg/cm}^2$.
- $Eci = 15,000 * \sqrt{350} = 280,624.30 \text{ Kg/cm}^2$.

Se toma una resistencia de 350 kg/cm² en 3 días, para mejorar la transferencia del pre esfuerzo, hacia el concreto. Teniendo una resistencia final a los 28 días de 490 kg/cm².

De acuerdo a esto tenemos dos resistencias, uno que se denominará “Resistencia del concreto en la transferencia del pre esforzado”, y la otra será, la “Resistencia del concreto de la viga pre esforzada”.

6.1.2. Propiedades de la sección de la viga

Las propiedades de la sección de la viga, se tomará en cuenta las referencias de las empresas que fabrican las vigas pre esforzadas.



Figura 51. Sección de viguetas comerciales

Sección típica Supermix (Izquierda), Sección típica Pretensa (Derecha)

Analizando las secciones que se puede observar en el mercado, utilizaremos una sección que nos facilite en el proceso constructivo, debido a que la sección sea fácil de desencofrar y tenga una buena área de contacto con el concreto de la losa y con el elemento aligerante (Bovedilla de arcilla, de concreto o Poliestireno).

- Eje centroidal: $Y_c = 4.644 \text{ cm}$.
- Inercia: $I = 999.23 \text{ cm}^4$.
- Módulo de sección superior: $S_1 = 135.84 \text{ cm}^3$.
- Módulo de sección inferior: $S_2 = 215.16 \text{ cm}^3$.
- Radio de giro al cuadrado: $r^2 = 11.23 \text{ cm}^2$.
- Distancia a la fibra superior: $C_1 = 7.36 \text{ cm}$.
- Distancia a la fibra inferior: $C_2 = 4.64 \text{ cm}$.
- Núcleo central inferior: $k_2 = 1.53 \text{ cm}$.

El eje que se tomara para cada alambre de alta resistencia, estará dado por las propiedades de la sección, en este caso se colocara alambre en la zona de tracción y compresión.

La excentricidad del alambre a tracción, está dado por el núcleo central inferior (k_2), y la excentricidad del alambre a compresión, está dado por el núcleo central superior (k_1).

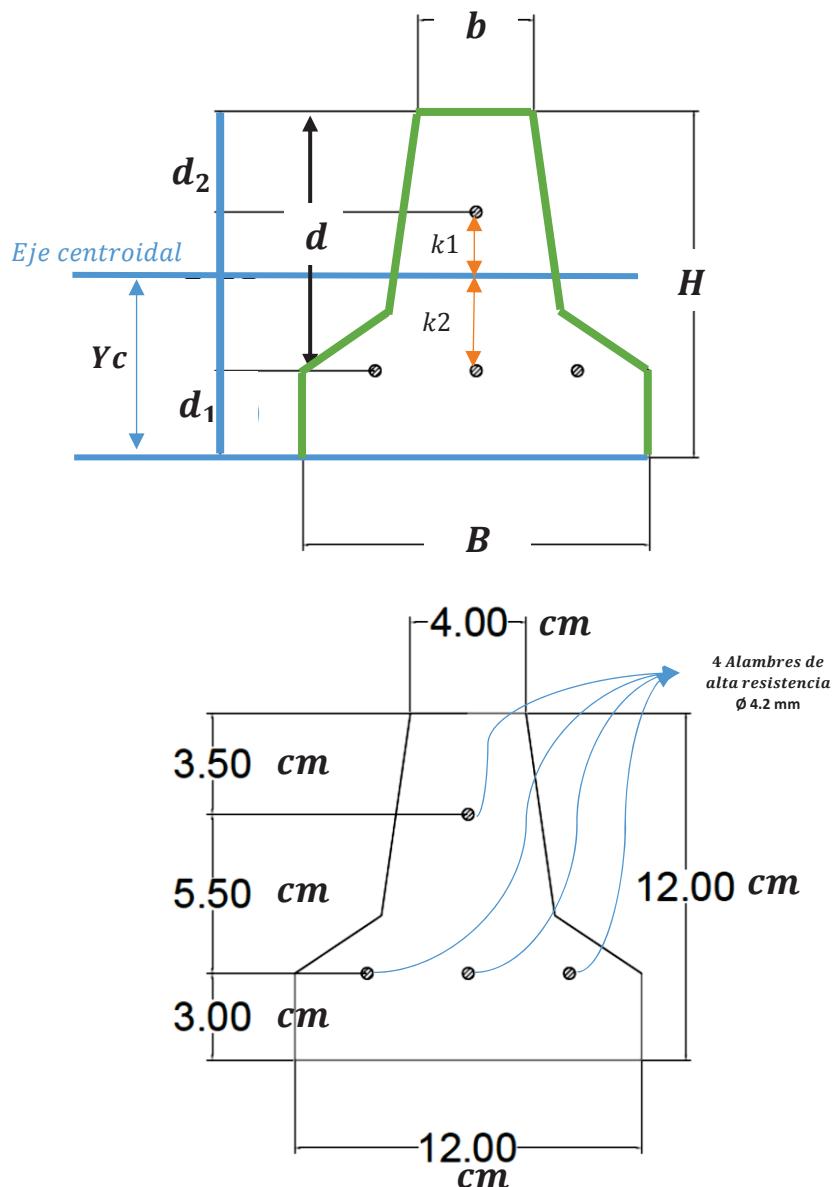


Figura 52. Sección transversal de la vigueta de diseño. Detalles de la sección (Superior), Dimensiones de la sección a diseñar (Inferior).

Como se muestra en la Figura 52, se tiene la distribución de los alambres para pre esforzado, se colocará 4 alambres, 3 en la zona de tracción y uno en la zona de compresión, de este modo determinará la longitud máxima que este puede alcanzar.

El número de alambres que se puede colocar, estará determinado por la sección que tendrá y las solicitudes a las que estará expuesta.

6.1.3. Condiciones de Pre esfuerzo

Las condiciones de pre esfuerzo están dadas por las propiedades del alambre, este alambre estará distanciado a 3 cm de la parte inferior, y 3.50 de la parte superior. Cada alambre se



pre esforzara a una fuerza de 1000 Kg (7,217.91 Kg/cm²). Que equivale al 75% del límite de fluencia (9,501.60 Kg/cm²). Se muestra en el Capítulo VII, las propiedades del alambre de alta resistencia.

- Distancia de la base al acero inferior: $d_1 = 3.00 \text{ cm}$.
- Diámetro del alambre de alta resistencia: $\text{Diam.} = 4.2 \text{ mm}$.
- Área total del acero: $A_s = 0.554 \text{ cm}^2$.
- Área del acero inferior: $A_{s2} = 0.416 \text{ cm}^2$ (3 alambres).
- Área del acero superior: $A_{s1} = 0.139 \text{ cm}^2$ (1 alambre).
- Esfuerzo de tensado: $f_{pj} = 7,217.91 \text{ Kg/cm}^2$.
- Fuerza total inicial: $P_j = 4000 \text{ Kg}$.
- Fuerza en cada alambre: $P = 1000 \text{ Kg}$.
- Módulo de elasticidad: $E = 2,000,000.00 \text{ Kg/cm}^2$.
- Excentricidad promedio: $e = 0.38 \text{ cm}$.

La excentricidad promedio se calcula:

$$e = \frac{P_{inferior}(Y_c - d_1) - P_{superior} * e_{superior}}{P_j}$$

$$e = \frac{3000.00 * 1.64 - 1000.00 * 3.42}{4000} = 0.38 \text{ cm}$$

Analizando la excentricidad promedio, podemos determinar las pérdidas que influirán en el comportamiento de la viga pre esforzada.

6.2. Perdidas de pre esfuerzo

6.2.1. Clasificación de las perdidas

Como se detalló en el capítulo III, se determinará las pérdidas de pre esfuerzo, que influyen en el comportamiento del mismo.

6.2.2. Perdidas por flujo plástico (PFP)

Luego de calcular las perdidas instantáneas, se pasa al cálculo de las pérdidas que ocurren durante el tiempo, una de estas pérdidas es la perdida por flujo plástico del concreto. Para su cálculo se usará la ecuación (1.5), teniendo así:

$$PFP = C_u \cdot n \cdot f_{cs} \quad (1.5)$$



$$f_{cs} = -\frac{0.9 * 3,733.76}{89} \left(1 + \frac{0.38^2}{11.23} \right) + \frac{4,272 * 0.38}{999.233} + \frac{28,272 * 9.72}{12,249.46}$$
$$= -15.34 \text{ Kg/cm}^2$$

Se toma en cuenta el factor recomendado (Nilson, Diseño de estructuras de Concreto Presforzado, 1982) Cu = 2.35, así como la relación modular (n) entre el acero y el concreto a los 28 días.

$$PFP = 2.35 * 6.02 * 15.34 = 217.12 \text{ Kg/cm}^2$$

$$PFP = \frac{217.12}{7,217.91} * 100 = 3.01\%$$

6.2.2.1. Perdidas por deslizamiento en el anclaje (PDA)

Usando la ecuación (1.2), tenemos:

$$PDA = \frac{\Delta l}{l} \cdot E_p \quad (1.2)$$

Durante el proceso constructivo se vio, un pequeño reacomodo del anclaje durante la transferencia de la fuerza al anclaje, dando un valor no mayor a $\Delta l = 1 \text{ mm}$,

La longitud total de la pista de elaboración de las viguetas tiene un total de 10 m. como se muestra en la Figura 53, siendo la longitud del alambre de alta resistencia.

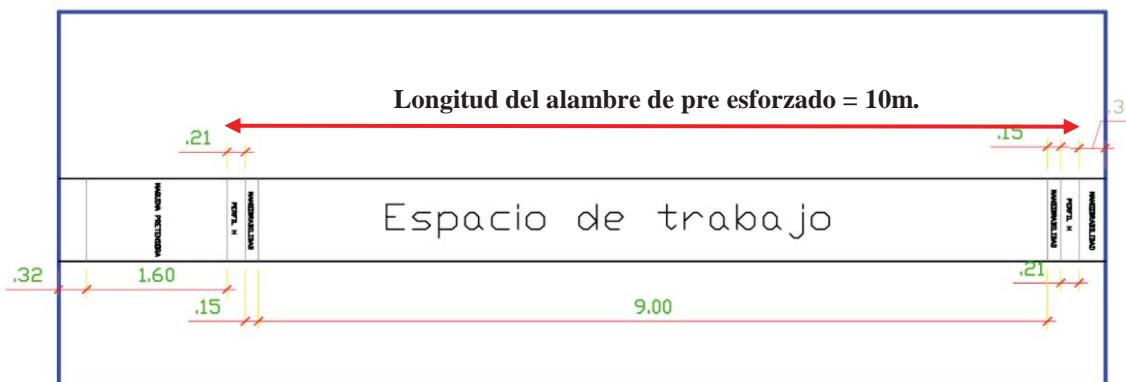


Figura 53. Distribución en planta, del espacio de trabajo para la elaboración de las viguetas pre esforzadas.

$$PDA = \frac{0.10 \text{ cm.}}{1000 \text{ cm.}} \cdot 2,000,000 \text{ Kg/cm}^2$$

$$PDA = 200.00 \text{ Kg/cm}^2$$

$$PDA\% = \frac{200.00}{7,217.91} * 100 = 2.77\%$$



Por medio de la ecuación (1.2), se puede observar que sufrió una perdida por deslizamiento de anclaje de 2.77%, siendo una perdida pequeña.

6.2.2.2. Perdida por acortamiento elástico del concreto (PAE)

Usando las ecuaciones (1.3) y (1.4), tenemos:

$$PAE = n \cdot f_{cs} \quad (1.3)$$

En donde:

$$f_{cs} = -\frac{P_i}{A_v} \left(1 + \frac{e^2}{r^2} \right) + \frac{M_o \cdot e}{I} \quad (1.4)$$

Para el caso de la perdida por acortamiento elástico del concreto, se tomará como pre esfuerzo inicial, un 90% de la fuerza ejercida por el equipo de pre esforzado 0.90Pj.

Usando la excentricidad promedio, el momento de inercia de la sección de la vigueta, y el momento por peso propio, tenemos el esfuerzo que provoca la fuerza de pre esfuerzo inicial en el centroide del acero:

$$f_{cs} = -\frac{0.9 * 4,000}{89} \left(1 + \frac{0.38^2}{11.23} \right) + \frac{4,272 * 0.38}{999.233}$$
$$f_{cs} = -39.35 \text{ Kg/cm}^2$$

Siendo “n”, la relación que existe entre los módulos de elasticidad del acero y del concreto en el momento de la transferencia, se tiene la perdida por acortamiento elástico del concreto.

$$PAE = \frac{2,000,000}{280,624.30} * 39.35 \text{ Kg/cm}^2 = 280.42 \text{ Kg/cm}^2$$

$$PAE\% = \frac{280.42}{7217.91} * 100 = 3.89\%$$

Por medio de las ecuaciones 1.3 y 1.4, se obtuvo una perdida por acortamiento elástico del concreto (PAE), de 3.89%. De esta manera se calculó las perdidas instantáneas, pudiendo así calcular la fuerza de pre esfuerzo inicial, que está dada por:

$$fpi = fpj - (PAE + PDA) = 7217.91 - (280.42 + 200) = 6,737.49 \text{ Kg/cm}^2$$
$$Pi = 3,733.76 \text{ Kg}$$



6.2.2.3. Perdidas por contracción del concreto (PRC)

Para determinar la contracción del concreto se tendrá que ver el tipo de curado que tendrá nuestra vigueta hasta el momento de que intervengan las cargas de servicio.

En este caso se usará las ecuaciones (1.5) y (1.6 a), teniendo:

$$PRC = E_p \cdot \epsilon_{sh} \quad (1.5)$$

El valor de ϵ_{sh} cuando el curado es con humedad se determina como:

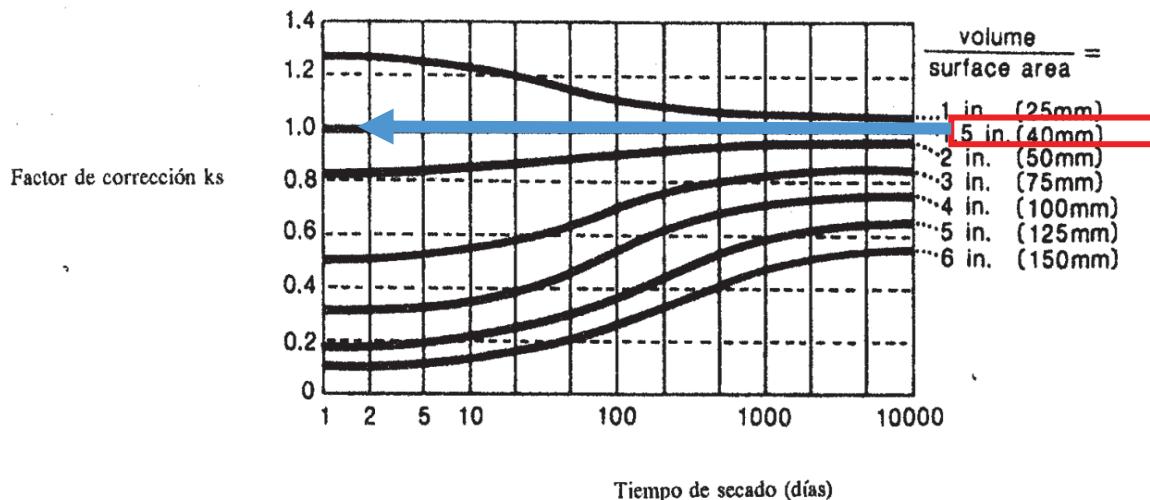
$$\epsilon_{sh} = -0.51 \times 10^{-3} \cdot Ks \cdot Kh \cdot \left(\frac{t}{35 + t} \right) \quad (1.6 a)$$

Para el valor de Kh, se tomará el valor de la Tabla 5, para una humedad mínima de 40%.

| Prom. Hum. Relativa en el ambiente | Kh |
|---------------------------------------|------|
| 40 % | 1.43 |
| 50 % | 1.29 |
| 60 % | 1.14 |
| 70 % | 1.00 |
| 80 % | 0.86 |
| 90 % | 0.43 |
| 100 % | 0 |



Para el valor de K_s , se tomará el valor del gráfico.



$$\frac{Volumen}{Area \ del \ elemento} = \frac{89.00}{25.50} = 3.5 \cong 40 \ mm.$$

Tomando cualquier tiempo de secado, se tiene que el valor de K_s es 1, en consecuencia, tenemos:

$$Kh = 1.43 \text{ (Segun Tabla 5.)}$$

$$K_s = 1.00 \text{ (Segun Gráfico 4.)}$$

$$\epsilon_{sh} = -0.51 \times 10^{-3} \cdot K_s \cdot Kh \cdot \left(\frac{t}{35 + t} \right)$$

Tomando un tiempo de 5 años, siendo un tiempo prudente para ver una mayor contracción del concreto. Se tiene:

$$\epsilon_{sh} = -0.51 \times 10^{-3} \cdot 1.43 \cdot 1.00 \cdot \left(\frac{1825}{35 + 1825} \right) = 0.0008$$

Tenemos el valor de 0.0008 para el valor de la deformación del concreto en un tiempo de 1825 días (5años), que se asemeja al valor recomendado (Nilson, Diseño de estructuras de Concreto Presforzado, 1982) en el capítulo III, para concretos curados con humedad. También se considera una retracción ultima en el concreto del 8% durante los 3 días antes de la transferencia de la fuerza de pre esfuerzo inicial.



$$PRC = 2,000,000 * 0.0008 * \left(\frac{100 - 8}{100} \right) = 1,445.75 \text{ Kg/cm}^2$$

$$PRC\% = \frac{1,445.75}{7,217.91} * 100 = 20.03\%$$

En consecuencia, tenemos una pérdida de 20.03% por contracción del concreto (PRC).

6.2.2.4. Perdidas por relajamiento del acero (PRA)

Para el cálculo de las perdidas por relajamiento del acero, influye el tiempo a la cual se quiere calcular la perdida, en este caso tomaremos 5 años (43,800 horas), también influye el tipo del acero, como es su esfuerzo a la fluencia, determinada por ensayos. (Ver capítulo VII).

Usando la ecuación (1.7), tenemos:

$$PRA = fpi \cdot \frac{\log t}{10} \left(\frac{fpi}{fpy} - 0.55 \right) \quad (1.7)$$

$$PRA = 6,737.49 \cdot \frac{\log 43,800}{10} \left(\frac{6,737.49}{9,501.60} - 0.55 \right) = 497.50 \text{ Kg/cm}^2$$

$$PRA\% = \frac{497.50}{7,217.91} * 100 = 6.89\%$$

Se tiene una perdida por relajamiento del acero (PRA) de 6.89%.

Finalmente, tenemos la Tabla 35, en que se resume las perdidas debido al pre esfuerzo en la viga:



Tabla 35. Resumen de pérdidas debidas al pre esfuerzo.

| | | | |
|---|--|--|---------------|
| Fuerza ejercida por el equipo de pre esforzado | | $f_{pj} = 7,217.91 \text{ Kg/cm}^2$ $P_j = 4,000.00 \text{ Kg}$ | |
| Perdidas Instantáneas | Perdida por deslizamiento del anclaje (PDA) | $PDA = 200.00 \text{ Kg/cm}^2$ | 2.77% |
| | Perdida por acortamiento elástico del concreto (PAE) | $PAE = 280.42 \text{ Kg/cm}^2$ | 3.89% |
| Fuerza de pre esfuerzo inicial | | $f_{pi} = 6,737.49 \text{ Kg/cm}^2$ $P_i = 3,733.76 \text{ Kg}$ | |
| Perdidas relacionadas con el tiempo | Perdida por flujo plástico (PFP) | $PFP = 217.12 \text{ Kg/cm}^2$ | 3.01% |
| | Perdida por contracción del concreto (PRC) | $PRC = 1,445.75 \text{ Kg/cm}^2$ | 20.03% |
| | Perdida por relajamiento del acero (PRA) | $PRA = 497.50 \text{ Kg/cm}^2$ | 6.89% |
| Fuerza de pre esfuerzo efectivo | | $f_{pe} = 4,574.81 \text{ Kg/cm}^2$ $P_e = 2,535.25 \text{ Kg}$ | |
| PERDIDA TOTAL | | | 36.59% |

6.3. Análisis y diseño de las viguetas pre esforzadas.

6.3.1. Análisis y diseño bajo flexión

6.3.1.1. Análisis bajo esfuerzos permisibles

Para el análisis de la vigüeta pre esforzada, primero determinaremos la distribución de la losa aligerada que se quiere analizar. En la Figura 54, se muestra la sección de la losa aligerada que tendrá un peralte de 20 cm y contará como elemento aligerante las bovedillas de Poliestireno de 15 cm de altura, el ancho entre viguetas será de 50 cm. Para este caso las cargas que se aplicaran en nuestra losa son:



- a) El peso propio de la vigueta pre esforzada (21.36 kg/m).
- b) El peso de la bovedilla de Poliestireno (4kg/m²).
- c) La capa superior de concreto que se define como la losa (estará comprendida por un espesor de 5cm W_c= 60kg/m).
- d) Los acabados que se tomara como 100 kg/m².
- e) La sobrecarga (200 kg/m², Segundo RNE E0.20 para viviendas).

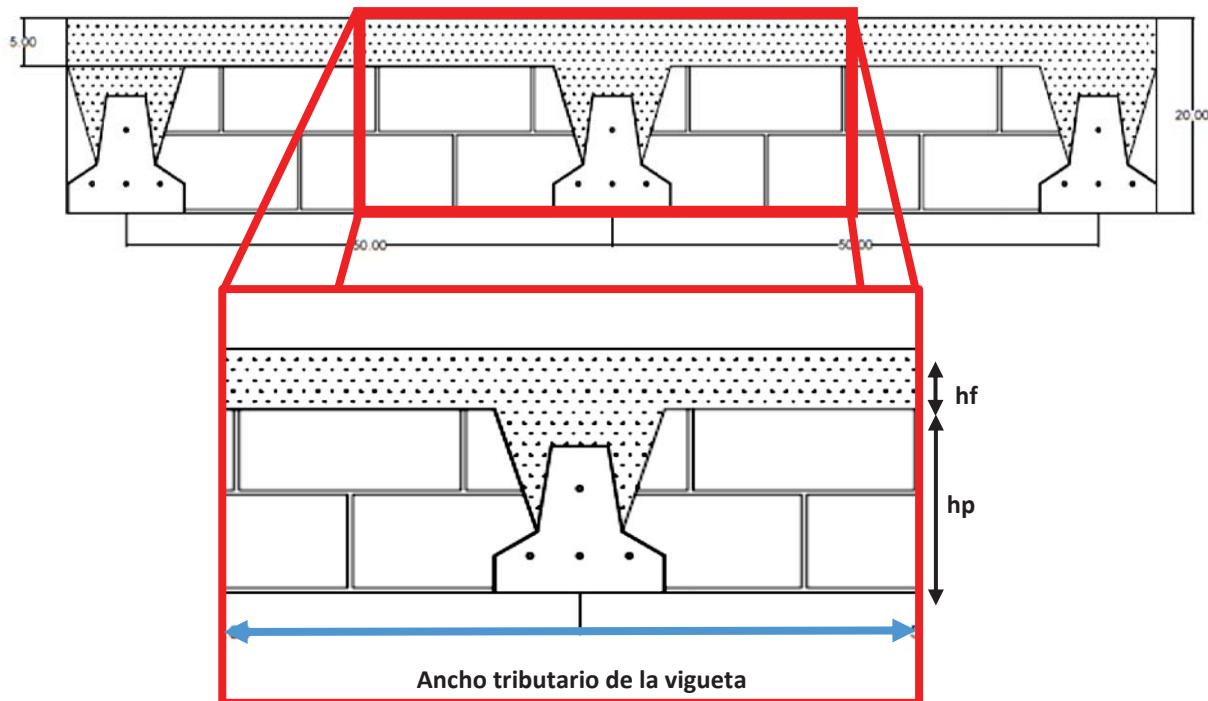


Figura 54. Sección de la losa aligerada con viguetas pre esforzadas.

Las cargas que se utilizaran, como se observa en la Figura 55, para este caso se analiza la vigueta pre esforzada como un elemento simplemente apoyado y con carga distribuida.

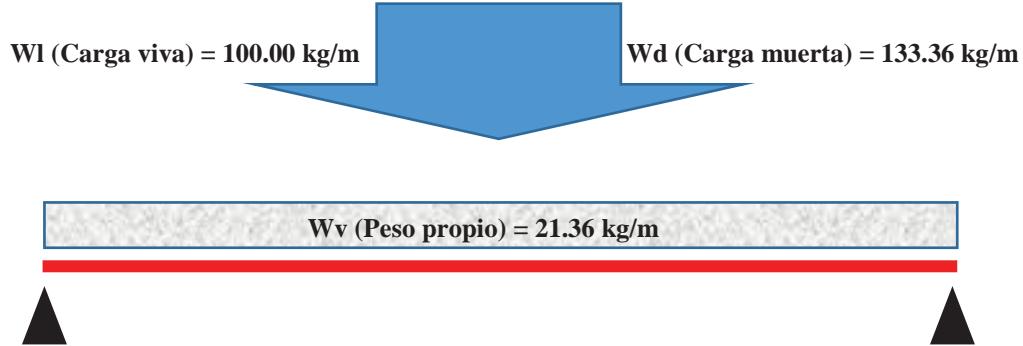


Figura 55. Cargas que soporta la vigueta pre esforzada.

$$Ra = 713.41 \text{ kg}$$

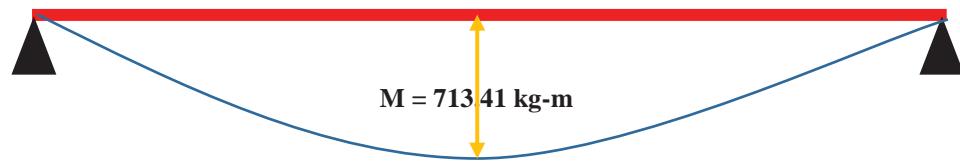
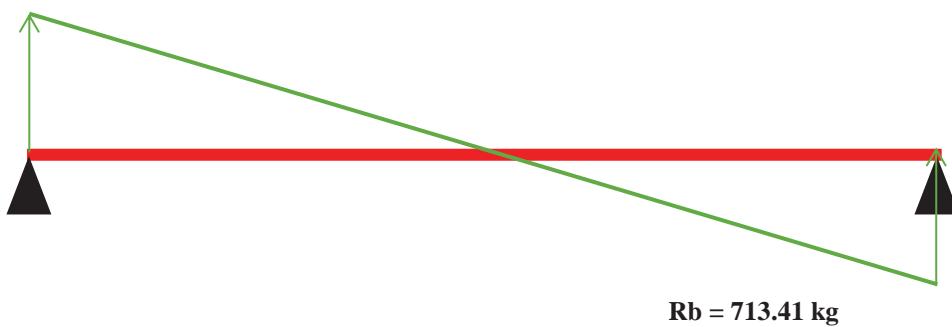


Figura 56. Momento y fuerzas producidas por la carga última (W_u)

Cuando aplicamos el pre esfuerzo P_i al concreto, los esfuerzos en la fibra superior (f_1) e inferior (f_2), vienen dado por las ecuaciones (1.8a y 1.8b) como se muestra a continuación:

$$f_1 = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 - \frac{eC_1}{r^2} \right) \quad (1.8 \text{ a})$$

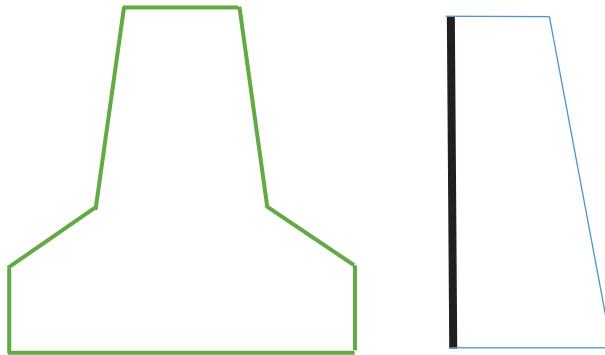


$$f_1 = -\frac{3,733.76}{89} \left(1 - \frac{0.38 * 7.36}{11.23} \right) = -31.54 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f_2 = -\frac{P_i}{A_c} \left(1 + \frac{eC_2}{r^2} \right) \quad (1.8 b)$$

$$f_2 = -\frac{3,733.76}{89} \left(1 + \frac{0.38 * 4.64}{11.23} \right) = -48.53 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f_1 = -31.54 \text{ Kg/cm}^2$$



$$f_2 = -48.53 \text{ Kg/cm}^2$$

Figura 57. Esfuerzos producidos por el pre esfuerzo P_i

Como el miembro provoca con su peso, un momento flector inverso al originado por el pre esfuerzo, tendremos que inmediatamente después de liberado el acero:

$$f_1 = -\frac{P_i}{A_v} \left(1 - \frac{eC_1}{r^2} \right) - \frac{M_o}{S_1} \quad (1.9 a)$$

$$f_1 = -\frac{3,733.76}{89} \left(1 - \frac{0.38 * 7.36}{11.23} \right) - \frac{4,272}{135.84} = -62.99 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f_2 = -\frac{P_i}{A_v} \left(1 + \frac{eC_2}{r^2} \right) + \frac{M_o}{S_2} \quad (1.9 b)$$

$$f_2 = -\frac{3,733.76}{89} \left(1 + \frac{0.38 * 4.64}{11.23} \right) + \frac{4,272}{215.16} = -28.68 \text{ Kg/cm}^2$$

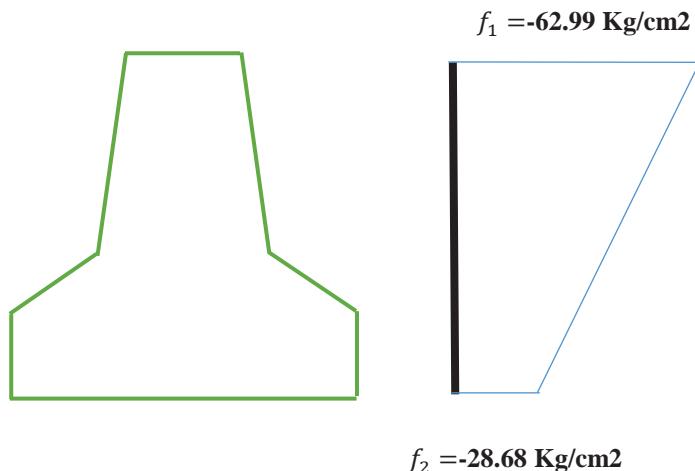


Figura 58. Esfuerzos producidos por el pre esfuerzo P_i y el peso propio M_o

Adicionando la carga de servicio tenemos:

$$f_1 = -\frac{Pe}{A_v} \cdot \left(1 - \frac{e \cdot c_1}{r^2}\right) - \frac{M_o}{S_1} + \frac{(M_d + M_l) \cdot (Ycc - hv)}{I_c} \quad (1.10 \text{ a})$$

$$f_1 = -\frac{2,536.53}{89} \cdot \left(1 - \frac{0.38 * 7.36}{11.23}\right) - \frac{4,272}{135.84} + \frac{(26,672 + 20,000) \cdot (13.99 - 12)}{12,249.46}$$

$$f_1 = -47.80 \text{ Kg/cm}^2$$

$$f_2 = -\frac{Pe}{A_v} \cdot \left(1 + \frac{e \cdot c_2}{r^2}\right) + \frac{M_o}{S_2} + \frac{(M_d + M_s) \cdot (Ycc)}{I_c} \quad (1.10 \text{ b})$$

$$f_2 = -\frac{2,536.53}{89} \cdot \left(1 + \frac{0.38 * 4.64}{11.23}\right) - \frac{4,272}{215.16} + \frac{(26,672 + 20,000) \cdot (13.99)}{12,249.46}$$

$$f_2 = 37.82 \text{ Kg/cm}^2$$

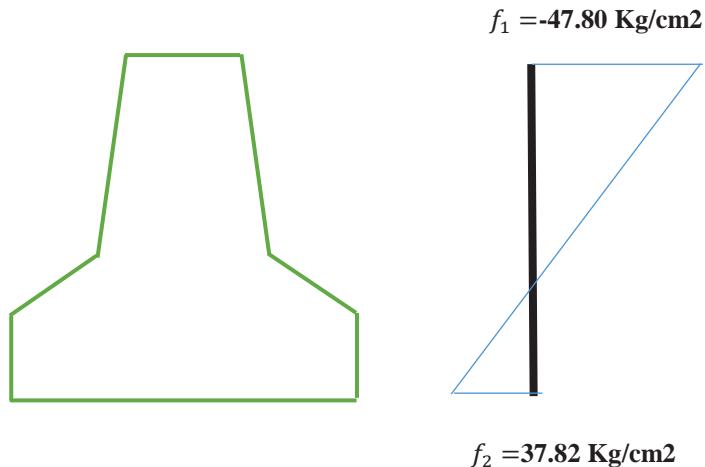


Figura 59. Esfuerzos producidos por las cargas de servicio

Se observa que los esfuerzos con las cargas de servicio la parte superior trabaja a tracción y la parte inferior trabaja a compresión. Siendo de igual forma.

6.3.1.1.1. Esfuerzos permisibles en el concreto

Para el caso de los esfuerzos permisibles (ACI 318-2002) se comparará con los esfuerzos obtenidos en la parte anterior, los cuales tiene que estar por debajo de los esfuerzos permisibles.

$$ft(i) = 0.6f'ci = 0.6 * 350 = 210 \text{ Kg/cm}^2$$
$$-48.53 \text{ Kg/cm}^2 < 210 \text{ Kg/cm}^2 \dots (OK)$$

$$fc(i) = 1.6\sqrt{f'ci} = 1.6\sqrt{350} = 29.93 \text{ Kg/cm}^2$$
$$-31.54 \text{ Kg/cm}^2 < 29.93 \text{ Kg/cm}^2 \dots (OK)$$

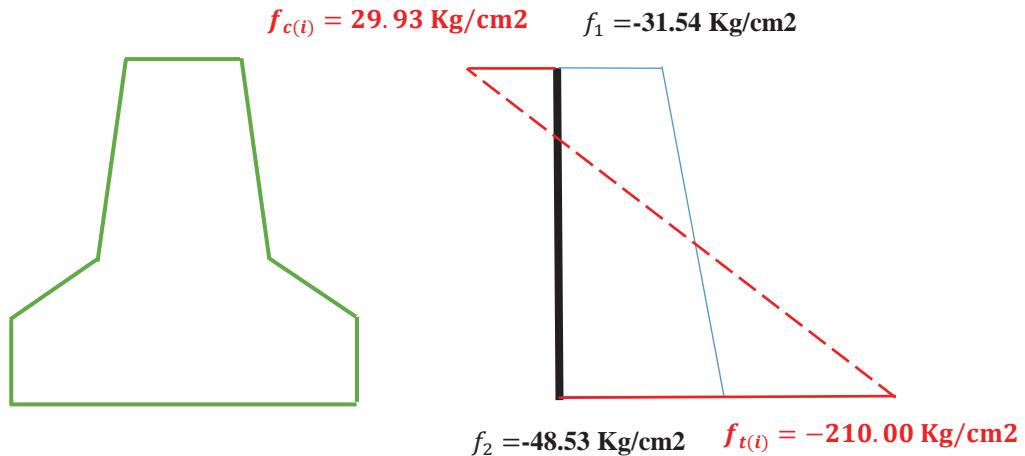


Figura 60. Esfuerzos permisibles e iniciales

$$f_t(s) = 0.45f'c = 0.45 * 490 = 220.50 \text{ Kg/cm}^2$$

$$37.82 \text{ Kg/cm}^2 < 220.50 \text{ Kg/cm}^2 \dots (\text{OK})$$

$$f_c(s) = 1.6\sqrt{f'c} = 1.6\sqrt{480} = 35.42 \text{ Kg/cm}^2$$

$$-47.80 \text{ Kg/cm}^2 < 35.42 \text{ Kg/cm}^2 \dots (\text{OK})$$

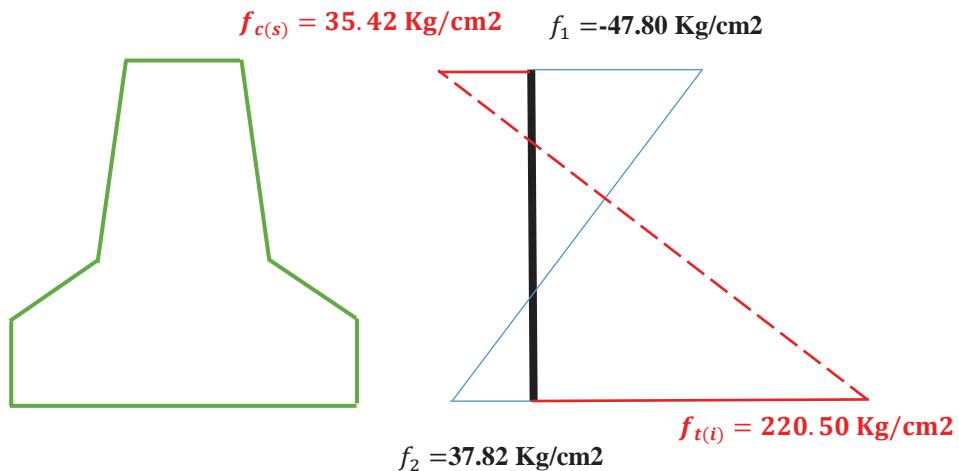


Figura 61. Esfuerzos permisibles y con cargas de servicio.



Como se muestra en las Figuras 60 y 61, nuestros esfuerzos obtenidos son menores que los esfuerzos permisibles, en este caso nuestra sección y cargas son aceptables para continuar con el análisis por resistencia a la ruptura.

6.3.1.2. Análisis y diseño por resistencia a la ruptura

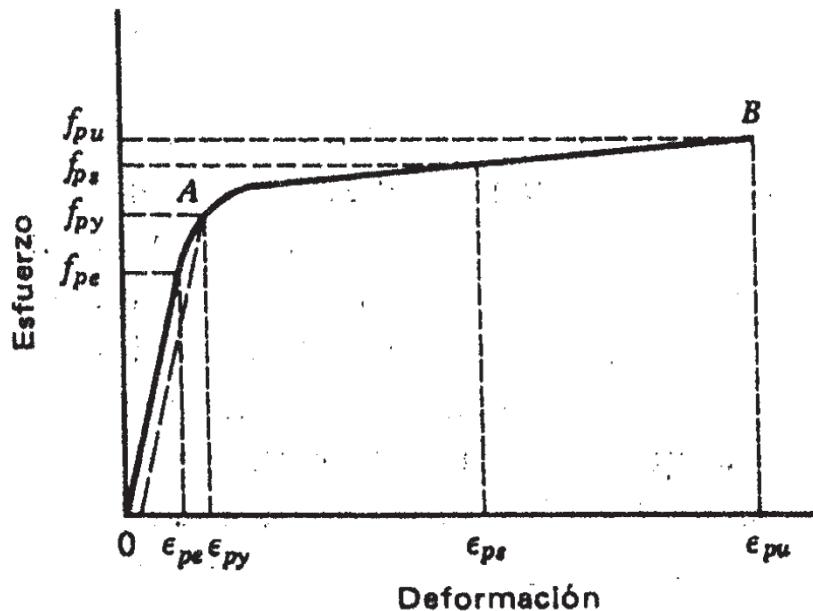


Gráfico 12. Gráfico esfuerzo deformación del acero.

Se tomará el Gráfico 12, como referencia para el diseño, siendo:

f_{py}, ϵ_{py} = esfuerzo y deformacion de fluencia del acero.

f_{ps}, ϵ_{ps} = esfuerzo y deformacion del acero cuando la viga falla.

f_{pu}, ϵ_{pu} = esfuerzo y deformacion ultima del acero.

6.3.1.2.1. Calculo del momento resistente usando ecuaciones ACI

La ϵ_1 es resultado de la fuerza pretensora después de ocurridas todas las pérdidas.

$$\epsilon_1 = \epsilon_{pe} = \frac{f_{pe}}{E_p} \quad (1.14)$$

$$\epsilon_1 = \epsilon_{pe} = \frac{4,577.12}{2,000.00} = 0.0023$$

La deformación dos, se debe a un pequeño incremento en el esfuerzo del acero a medida que se van agregando las cargas muertas y vivas. Suponiendo que se mantiene una adherencia perfecta entre acero y concreto tendremos que:



$$\epsilon_2 = \frac{Pe}{A_c E_c} \left(1 + \frac{e^2}{r^2} \right) \quad (1.15)$$

$$\epsilon_2 = \frac{2,536.53}{89 * 2,000,000} \left(1 + \frac{0.38^2}{11.23} \right) = 0.0001$$

En el estado de falla, el eje neutro está a una distancia “c” por debajo de la parte superior de la sección. Por relación de triángulos.

$$fps = fpu \left(1 - 0.5 \delta_p \frac{fpu}{f'c} \right) \quad (1.21)$$

$$\delta_p = \frac{A_p}{b \cdot d} \quad (1.22)$$

Como vimos en las propiedades de la sección de la vigueta (5.2.1.1.2.) se toma 4 alambres para el pre esfuerzo, dado un área de 0.554 cm². Este valor ayudara con las siguientes ecuaciones siguientes.

$$\delta_p = \frac{0.554}{17 * 50} = 0.00065$$

$$fps = 10,540.04 \left(1 - 0.5 * 0.00065 \frac{10,540.04}{210} \right) = \mathbf{10,367.59 \text{ Kg/cm}^2}$$

$$fps = fpe + 4200 = 4,577.12 + 4,200 = \mathbf{8,777.12 \text{ Kg/cm}^2} \dots (\text{menor})$$

$$fps = fpy = \mathbf{9,501.60 \text{ Kg/cm}^2}$$

$$a = \beta_1 \cdot c = \frac{A_s \cdot fps}{0.85 \cdot f'c \cdot b} \quad (1.18)$$

$$a = \beta_1 \cdot c = \frac{0.554 * 8,777.12}{0.85 * 210 * 50} = \mathbf{0.54 \text{ cm}}$$

$$c = \mathbf{0.64 \text{ cm}}$$

$$\epsilon_3 = \epsilon_{cu} \frac{(d - c)}{c} \quad (1.16)$$

$$\epsilon_3 = 0.002 \frac{(17 - 0.64)}{0.64} = \mathbf{0.0383}$$

La deformación en la falla es la suma:

$$\epsilon_{ps} = \epsilon_1 + \epsilon_2 + \epsilon_3 \quad (1.17)$$

$$\epsilon_{ps} = 0.0023 + 0.0001 + 0.0383 = \mathbf{0.0406}$$

Se puede observar que la deformación de falla es mayor, al que se obtuvo en ensayos del acero (Capítulo VII - Acero), pero a medida que se va aumentando el valor de fps la



deformación de falla disminuía, y por el contrario el momento resistente factorizado aumentaba dándonos longitudes de viguetas mayores, por lo cual se toma el menor f_{ps} , debido a que nos dará una menor longitud de la viga, poniéndonos del lado de la seguridad.

Finalmente, el momento resistente factorizado será:

$$\phi M_n = \phi \cdot A_p \cdot f_{ps} \left(d - \frac{a}{2} \right) \quad (1.19)$$

$$\phi M_n = 0.9 * 0.554 * 8,774.81 * \left(17 - \frac{0.54}{2} \right)$$

$$\phi M_n = 73,227.45 \text{ Kg} - \text{cm}$$

$$\phi M_n = 732.27 \text{ Kg} - \text{m}$$

Tomando como resistencia última, el valor hallado (ϕM_n), hallaremos longitud máxima que nuestra viga podrá resistir:

$$L_{maxima} = \sqrt{8 * \frac{\phi M_n}{W_u}}$$

Siendo $W_u = 1.4Wd + 1.7Wl$

$$W_u = 1.4(133.36) + 1.7(100) = 356.70 \text{ kg/m}$$

$$L_{maxima} = \sqrt{8 * \frac{732.27}{356.70}} = 4.05 \text{ m}$$

Se toma una longitud de 4 metros, para las revisiones correspondientes de la viga pre esforzada.

$$Mu = 1.4Md + 1.7Ml$$

$$Mu = 1.4(266.72) + 1.7(200) = 713.41 \text{ Kg} - \text{m}$$

$$Mu = 713.41 \text{ Kg} - \text{m} < 732.27 \text{ Kg} - \text{m} \dots (OK)$$

6.3.2. Revisión por cortante

Como ya se vio en anteriormente, se analizará una viga pre esforzada de 4m. Se determinará si la viga pre esforzada, sufre daños por corte, para lo cual se hará una revisión por corte, como se detalla a continuación.

$$Vu = \frac{W_u \cdot L}{2}$$

$$Vu = \frac{367.90 * 4.00}{2} = 713.41 \text{ Kg}$$



$$M_{cr} = M'_{cr} + M_o = 500.24 + 42.72 = \mathbf{542.96 \text{ Kg} - m}$$

Para hacer la revisión por cortante, se halla los valores de cortante ultimo y el valor de momento de agrietamiento, siendo valores importantes para esta revisión.

$$V_{ci} = 0.16 \cdot \sqrt{f'c} \cdot bw \cdot d + \frac{Vu \cdot M_{cr}}{Mu} \quad (1.24)$$

$$V_{ci} = 0.16 \cdot \sqrt{490} \cdot 4 \cdot 17 + \frac{713.41 \cdot 542.96}{713.41} = \mathbf{783.80 \text{ Kg}}$$

Se observa que el valor de cortante último es menor que el valor de la cortante que puede resistir el concreto.

$$\mathbf{783.80 \text{ Kg} > 713.41 \text{ Kg} \dots (OK)}$$

La falla que produce la cortante que se produce en el alma, es representada mediante la ecuación (1.25):

$$V_{cw} = (0.93\sqrt{f'c} + 0.3fcc)bw \cdot d + V_p \quad (1.25)$$

$$V_{cw} = (0.93\sqrt{490} + 0.3 \cdot 117.14) \cdot 4 \cdot 17 = \mathbf{3,789.57 \text{ Kg}}$$

$$\mathbf{3,789.57 \text{ Kg} > 713.41 \text{ Kg} \dots (OK)}$$

Finalmente, se hace la revisión mediante una expresión simplificada:

$$V_c = \left(0.16\sqrt{f'c} + \frac{49 \cdot Vu \cdot d}{Mu} \right) bw \cdot d \quad (1.26)$$

$$V_c = \left(0.16\sqrt{480} + \frac{49 \cdot 713.41 \cdot 17}{71,341} \right) \cdot 4 \cdot 17 = \mathbf{807.28 \text{ Kg}}$$

$$\mathbf{807.28 \text{ Kg} > 735.81 \text{ Kg} \dots (OK)}$$

El valor de la cortante ultima no excede, los valores de cortante que se revisaron en este parte. Por lo que se puede precisar que la viga pre esforzada no presentara fallas producidas por cortante.

6.3.3. Revisión de las deflexiones

Como siguiente revisión se tiene la revisión de las deflexiones que presentara la viga pre esforzada debida a las diferentes cargas que se presentan.



$$\Delta_{pi} = \frac{P_i \cdot e \cdot L^2}{8 \cdot Ec \cdot I}$$

$$\Delta_{pi} = \frac{3,733.76 * 0.38 * 400^2}{8 * 332,039.15 * 999.23} = \mathbf{0.085 \text{ cm}}$$

$$\Delta_{pe} = \Delta_{pi} \cdot \frac{Pe}{Pi} = 0.085 * \frac{2,536.53}{3,733.76} = \mathbf{0.058 \text{ cm}} \quad (1.30)$$

Las deflexiones producidas por el peso propio, carga muerta y carga viva, están dadas por la siguiente ecuación.

$$\Delta = \frac{5 \cdot W \cdot L^4}{384 \cdot Ec \cdot I}$$

La deflexión producida por el peso propio es:

$$\Delta_o = \frac{5 * 0.214 * 400^4}{384 * 332,039.15 * 999.23} = \mathbf{0.215 \text{ cm}}$$

La deflexión producida por la carga muerta es:

$$\Delta_d = \frac{5 * 1.334 * 400^4}{384 * 332,039.15 * 12,249.46} = \mathbf{0.110 \text{ cm}}$$

La deflexión producida por la carga viva es:

$$\Delta_l = \frac{5 * 1 * 400^4}{384 * 332,039.15 * 12,249.46} = \mathbf{0.082 \text{ cm}}$$

Para determinar la deflexión final, se determinará la flecha a los 6 meses y 5 años, utilizando el valor de flujo plástico.

$$C_t = \frac{t^{0.6}}{10 + t^{0.6}} \cdot Cu \quad (1.32)$$

$$C_t = \frac{180^{0.6}}{10 + 180^{0.6}} \cdot 2.35 = \mathbf{1.628} \quad (t = 6 \text{ meses})$$

$$\Delta = -\Delta_{pe} - \frac{\Delta_{pi} + \Delta_{pe}}{2} \cdot Cu + (\Delta_o + \Delta_d + \Delta_{ls})(1 + Cu) + \Delta_l \quad (1.31)$$

$$\Delta = -0.058 - \frac{0.058 + 0.085}{2} \cdot 1.628 + (0.215)(1 + 1.628) = \mathbf{0.390 \text{ cm}}$$

A los 6 meses se muestra una flecha de 0.390 cm producido solo por el peso propio, se considera el tiempo de 6 meses, en el caso de que la vigüeta pre esforzada no se haya usado, haciendo que el flujo plástico sea mayor. Debido a la calidad del alambre que se utiliza no se observa la contra flecha característica en viguetas pre esforzadas que se debería apreciar a esta edad, debido a que influye las propiedades a la tracción del alambre.



Para el caso de la deflexión final a los 5 años se muestra a continuación:

$$C_t = \frac{1,825^{0.6}}{10 + 1,825^{0.6}} \cdot 2.35 = 2.116 \quad (t = 5 \text{ años})$$

$$\Delta = -0.058 - \frac{0.058 + 0.085}{2} \cdot 2.116 + (0.215 + 0.110 + 0.082)(1 + 2.116) + 0.049 \\ \Delta = 1.037 \text{ cm}$$

La deflexión a los 5 años es de 1.037 cm, siendo una deflexión aceptable, comparado con la deflexión permisible por el RNE, se tiene:

$$\Delta = \frac{L}{240} = \frac{400}{240} = 1.667 \text{ cm}$$

Se observa que la deflexión a los 5 años que se producirá, con las cargas de servicio es menor (**1.037 cm. < 1.667 cm.**) que la deflexión máxima que estipula el RNE.

Los cálculos que se detallaron en este diseño, se realizaron mediante Excel, y los cuadros que se utilizaron se encuentra en el Anexo 2.



CAPÍTULO VII

7. METODOLOGÍA PARA LA ELABORACIÓN DE VIGUETAS PRE ESFORZADAS EN CUSCO.

En el siguiente capítulo se detallan las características principales de los equipos y el procedimiento constructivo que se adoptó para fabricar viguetas pre esforzadas con agregados de la zona de Cusco, se tomó muy en cuenta la tecnología y los materiales con los que se cuenta.

7.1. Proceso de elaboración de las viguetas pre esforzadas

7.1.1. Preparación y ubicación del lugar de trabajo

Para elaborar viguetas pre esforzadas con agregados de la zona de Cusco es necesario contar con un ambiente amplio el cual permita el libre tránsito, la colocación de los apoyos y la maquina pretensora de acero. Esta área de trabajo debe estar completamente nivelada para garantizar la horizontalidad de las viguetas pre esforzadas.



Figura 62. Preparación del lugar de trabajo.

7.1.2. Colocación de moldes para viguetas pre esforzadas

Con las dimensiones determinadas en el diseño y utilizando planchas de acero de 2mm de espesor se fabricaron tres moldes de nueve metros cada uno.



Figura 63. Colocación de moles de acero.

7.1.3. Instalación de la maquina pre tensora artesanal

Se instala la máquina artesanal para pre esforzar acero que se ideo, colocándolo en un extremo del área de trabajo.



Figura 64. Maquina artesanal para pre esforzar.

La fuerza aplicada se mide mediante la deformación del alambre de acero, según los ensayos realizados, la deformación unitaria del acero utilizado es de 0.01653 en el punto de fluencia, se toma el 75% del límite de fluencia como la fuerza pretensora, la deformación unitaria para este caso será de 0.0124 para los 9 metros de acero con los que



se trabajó se tuvo una deformación total de 12 cm, siendo equivalente a 1000kg de fuerza de pretensado en cada alambre de alta resistencia.

7.1.4. Colocación de anclajes y seguros

Se coloca los anclajes debidamente empotrados en el suelo para que soporte la fuerza de tensado de la máquina y colocándolos a 15 cm de los moldes de acero para poder realizar el corte de los alambres para pre esfuerzo de manera sencilla.



Figura 65. Colocación del anclaje y seguros.

7.1.5. Fabricación de mecanismos de sujeción

Se utilizaron dos mecanismos diferentes de sujeción para el alambre de alta resistencia, uno en el extremo fijo y otro en el extremo donde opera la maquina pre tensora:

- Sujeción fija



Figura 66. Mecanismo de sujeción fija.



➤ Sujeción móvil



Figura 67. Cuña artesanal (Sujeción móvil)

7.1.6. Colocación del acero

El alambre de alta resistencia ArcelorMittal belgo 60 de 4.2mm se comercializa en rollos de aproximadamente 180kg, para fabricar las viguetas pre esforzadas se cortó el alambre cada 10 metros, en cada vigueta se colocaron cuatro alambres de 10 metros cada uno, asegurándolos fijamente con los candados antes expuestos y colocados por las guías perforadas en los muelles de anclaje.



Figura 68. Colocación del acero.

7.1.7. Tensado del acero

Para pretensar el acero se engancha la maquina a un cable y se acciona el motor, la fuerza rotativa transformada en fuerza de tensión jala el alambre obteniendo la deformación necesaria para ejercer 1000kg de fuerza tensora sobre cada alambre, esto es equivalente a 12cm de elongación en cada uno. Una vez alcanzada esta deformación se aseguran los alambres con los seguros móviles.



Figura 69. Tensado del acero.

7.1.8. Vaciado de concreto

Una vez colocado el acero en la posición correcta y tensado se vierte el concreto con sumo cuidado para no desplazar los alambres de alta resistencia, para acomodar las partículas de concreto y evitar las cangrejeras se vibró ligeramente, para facilitar su transporte se colocaron ganchos de acero galvanizado cada 1.5 metros.



Figura 70. Vaciado del concreto.

7.1.9. Destensado y desencofrado

Según el diseño planteado la resistencia mínima para la transmisión de esfuerzos entre el acero pre tensado y el concreto fue de 350 Kg/cm^2 , de acuerdo al ensayo de compresión axial en las briquetas obtenidas en el vaciado se obtuvo una resistencia promedio de 358.41 kg/cm^2 , teniendo este resultado se procede a cortar los alambres de alta resistencia en ambos extremos y asegurar la transmisión de esfuerzos. Una vez el concreto alcanzó la resistencia de destensado se procede a cortar los alambres de ambos extremos y a



desencofrar las viguetas pre tensadas. Durante todo este proceso se mantuvo el concreto en contacto con el agua para garantizar la resistencia de diseño.



Figura 71. Destensado y desencofrado.

7.1.10. Corte y curado

Con la ayuda de una amoladora se cortaron las viguetas a la longitud de diseño, se cortaron cada 4.5 metros para realizar el ensayo a flexión en campo y también se cortaron cada metro de longitud para realizar el ensayo de flexión en la vigueta pre esforzada por método de carga al centro de la luz. El almacenamiento y transporte ya no es un problema cuando las viguetas tienen esta longitud, todo esto se complementa con el curado del concreto constante del concreto.



Figura 72. Corte y almacenamiento de viguetas pre esforzadas.



7.2. Resistencia a la compresión axial de testigos de concreto tomados durante la fabricación de viguetas pre esforzadas

A continuación, se detalla la resistencia del concreto utilizado para la fabricación de las viguetas pre esforzadas durante el vaciado de las mismas, se tomaron nueve briquetas de concreto para controlar su resistencia y el cronograma de rupturas fue como se indica en la Tabla 36.

Tabla 36. Cronograma de roturas de testigos cilíndricos.

| <i>Edad del concreto</i> | <i>Nº de briquetas</i> |
|--------------------------|------------------------|
| 3 días | 3 |
| 7 días | 3 |
| 28 días | 3 |

- Resistencia a la compresión de las briquetas de concreto utilizado en la fabricación de viguetas pre esforzadas a tres días de edad.

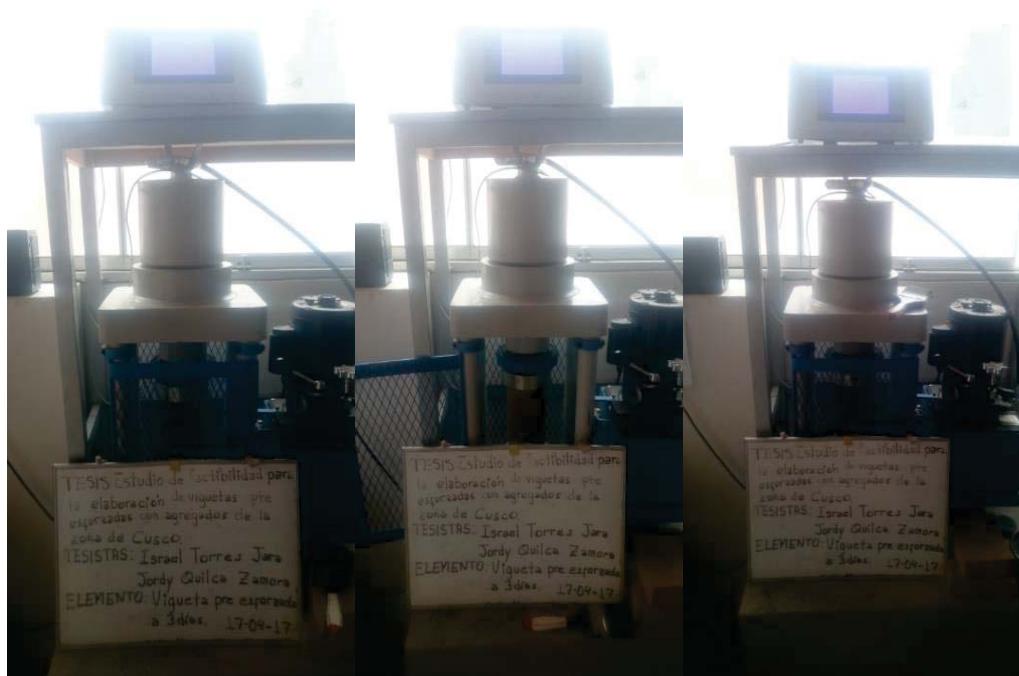


Figura 73. Rotura de briquetas a los 3 días.

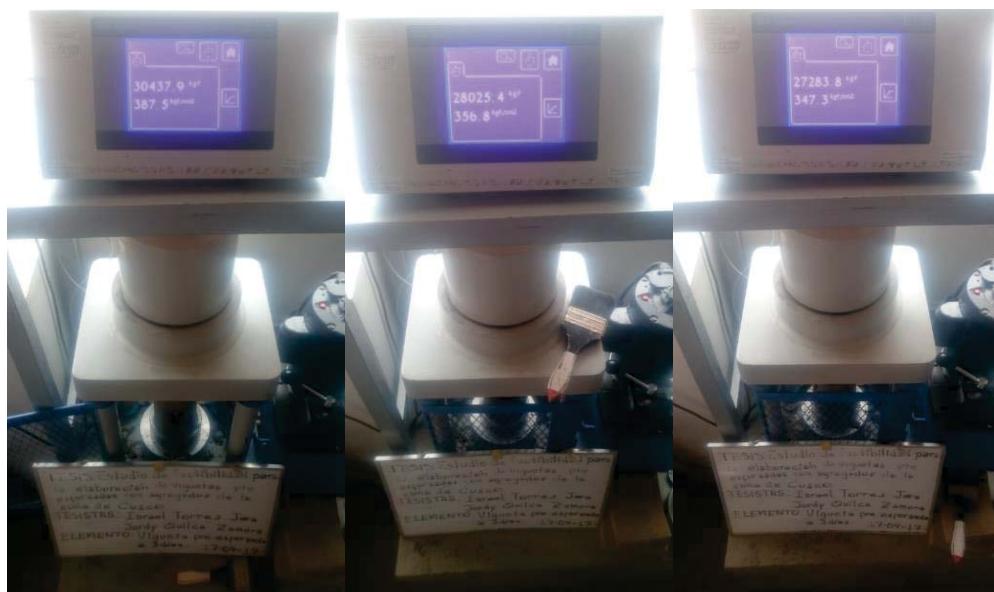


Figura 74. Rotura de briquetas a los 3 días.

Tabla 37. Rotura de briquetas a los 3 días.

| CARGA (kg) | DIAMETRO (cm) | AREA (cm ²) | RESISTENCIA (Kg/cm ²) |
|-----------------|------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| 30437.90 | 10.22 | 82.03 | 371.04 |
| 28025.40 | 10.05 | 79.33 | 353.29 |
| 27283.80 | 9.95 | 77.76 | 350.89 |

- Resistencia a la compresión de las briquetas de concreto utilizado en la fabricación de viguetas pre esforzadas a siete días de edad.

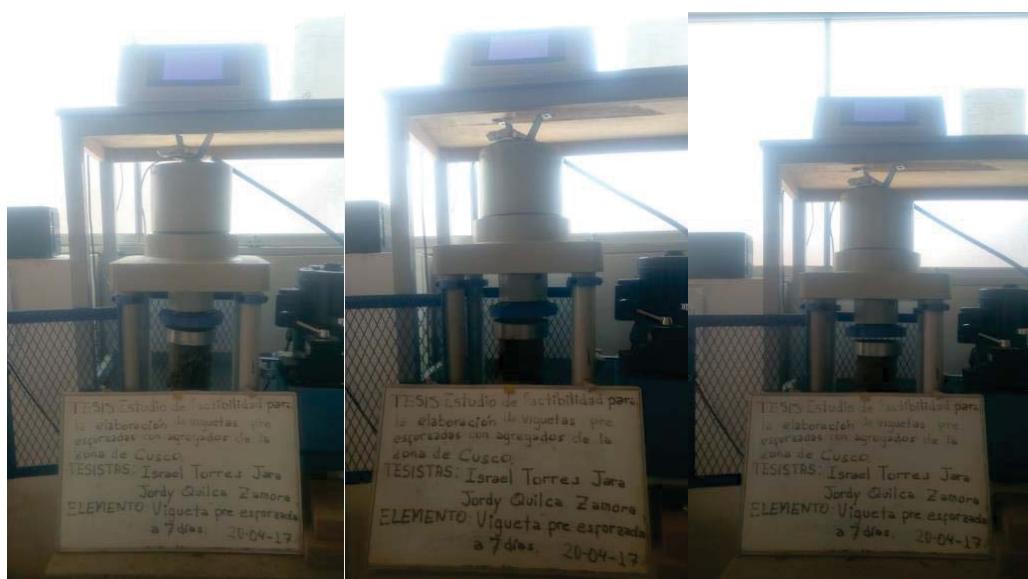


Figura 75. Rotura de briquetas a los 7 días.

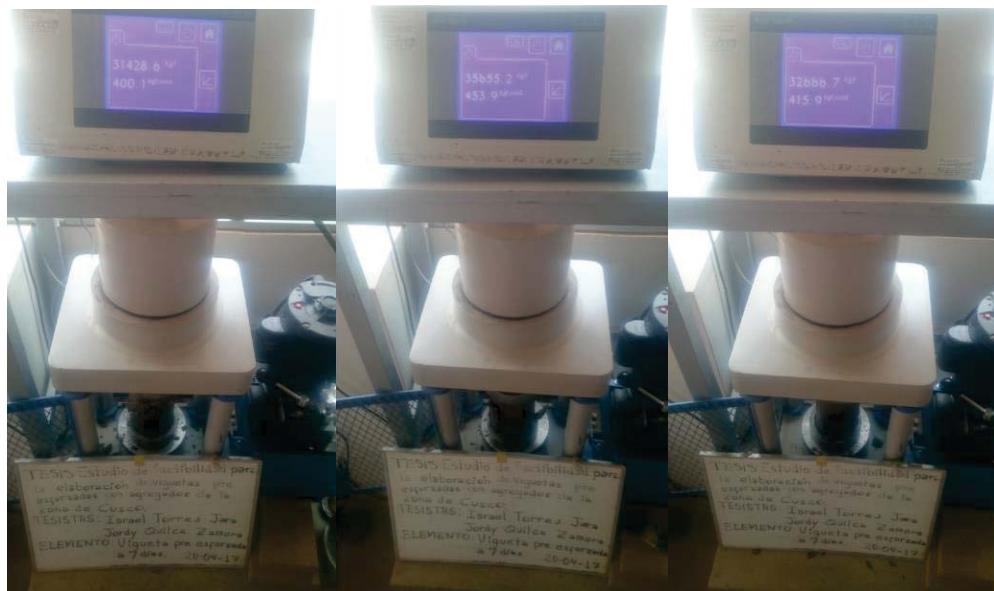


Figura 76. Rotura de briquetas a los 14 días.

Tabla 38. Rotura de briquetas a los 14 días.

| CARGA (kg) | DIAMETRO (cm) | AREA (cm ²) | RESISTENCIA (Kg/cm ²) |
|-----------------|------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| 31428.60 | 10.00 | 78.54 | 400.16 |
| 35655.20 | 10.21 | 81.87 | 435.49 |
| 32666.70 | 10.00 | 78.54 | 415.92 |

- Resistencia a la compresión de las briquetas de concreto utilizado en la fabricación de viguetas pre esforzadas a veintiocho días de edad.

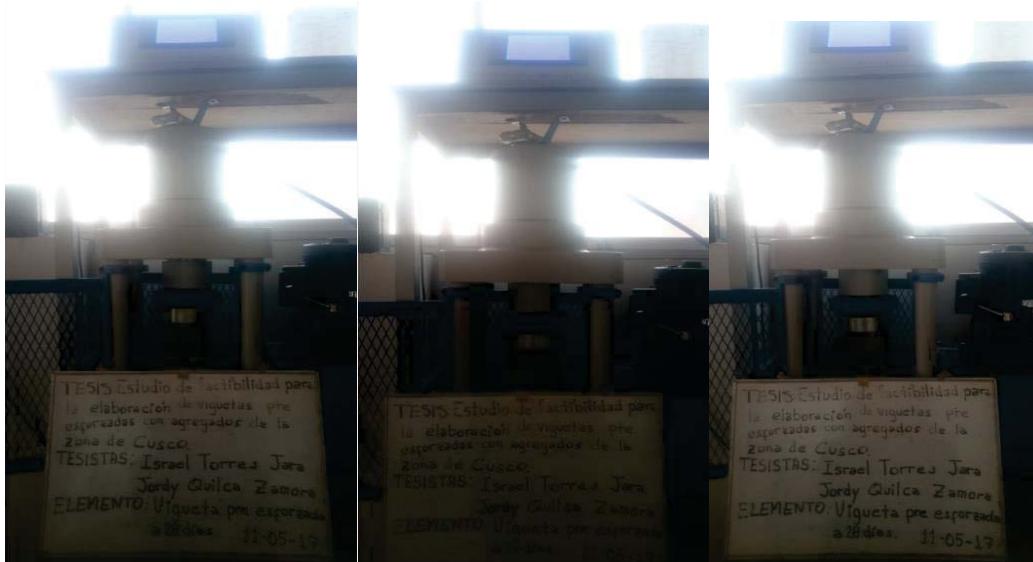


Figura 77. Rotura de briquetas a los 28 días.

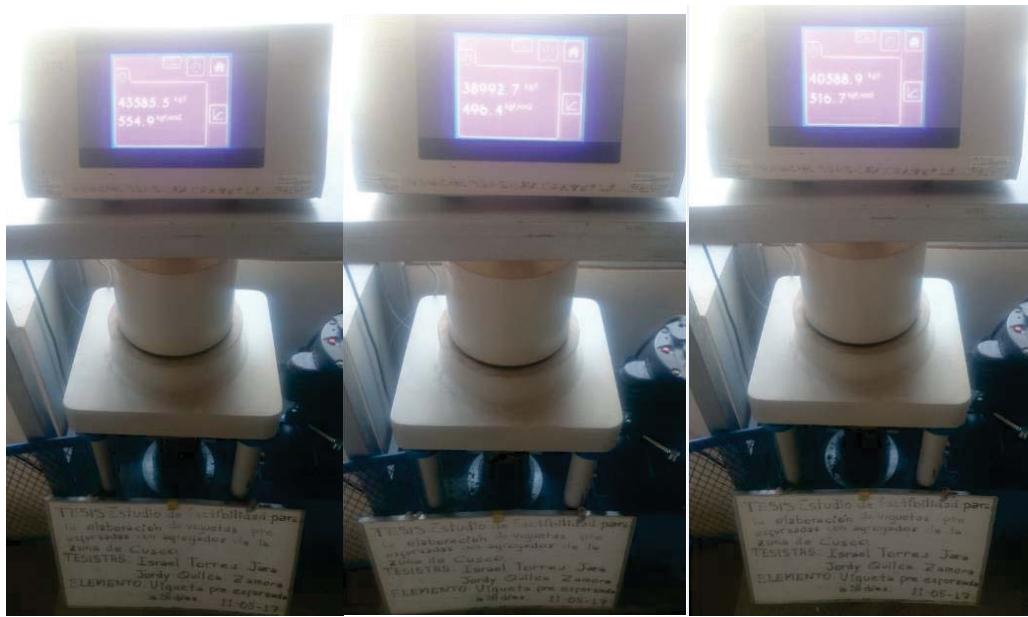


Figura 78. Rotura de briquetas a los 28 días.

Tabla 39. Rotura de briquetas a los 28 días.

| CARGA (kg) | DIAMETRO (cm) | AREA (cm ²) | RESISTENCIA (Kg/cm ²) |
|-----------------|------------------|----------------------------|--------------------------------------|
| 43585.50 | 10.16 | 81.07 | 537.61 |
| 38992.70 | 10.00 | 78.54 | 496.47 |
| 40588.90 | 10.16 | 81.07 | 500.64 |

7.3. Pruebas a flexión en viguetas pre esforzadas

7.3.1. Pruebas a flexión utilizando la maquina universal.

Para realizar las pruebas a flexión mediante la maquina universal, se realizará una variante de los requisitos de las normas ASTM C31/C31M y ASTM C192/C192M, aplicables a los especímenes de vigas y teniendo una luz libre entre apoyos de 0.90 m, al momento de ensayarlos. Los lados del espécimen deben estar a ángulos rectos con las caras superiores e inferiores. Todas las superficies del espécimen deben ser lisas, libres de cicatrices, indentaciones, agujeros o marca de identificación inscritas. Como se muestra en la Figura 79.

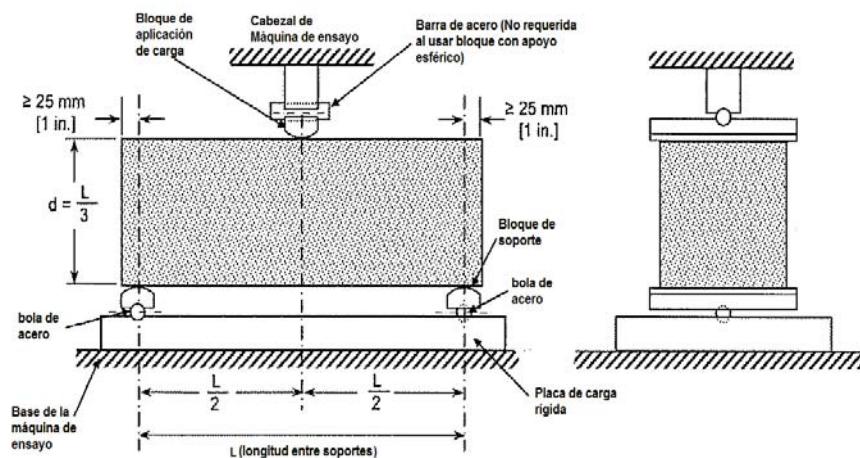


Figura 79. Diagrama de un aparato apropiado para el ensayo de flexión en el concreto por el método de carga al centro de la luz.

Se prepararon 18 muestras de 1.00 m, los que se colocaron en la maquina universal como se muestra en la Figura 80, con una longitud entre los soportes de 0.90 m. y aplicando una carga que se coloca en la parte central de cada muestra.

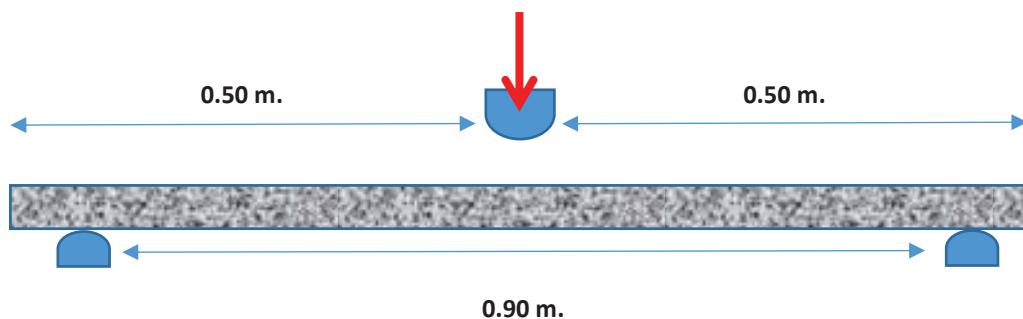


Figura 80. Diagrama del ensayo a flexión en la vigueta pre esforzada por método de carga al centro de la luz.

Realizado los ensayos, se procesaron los datos (Ver anexo 4), obteniendo la Tabla 40, donde se muestra la Carga Máxima (Kg), la cual soportó cada vigueta y la Deflexión Máxima (cm), así también se puede ver las curvas carga – deflexión, que se muestra en el Gráfico 13.

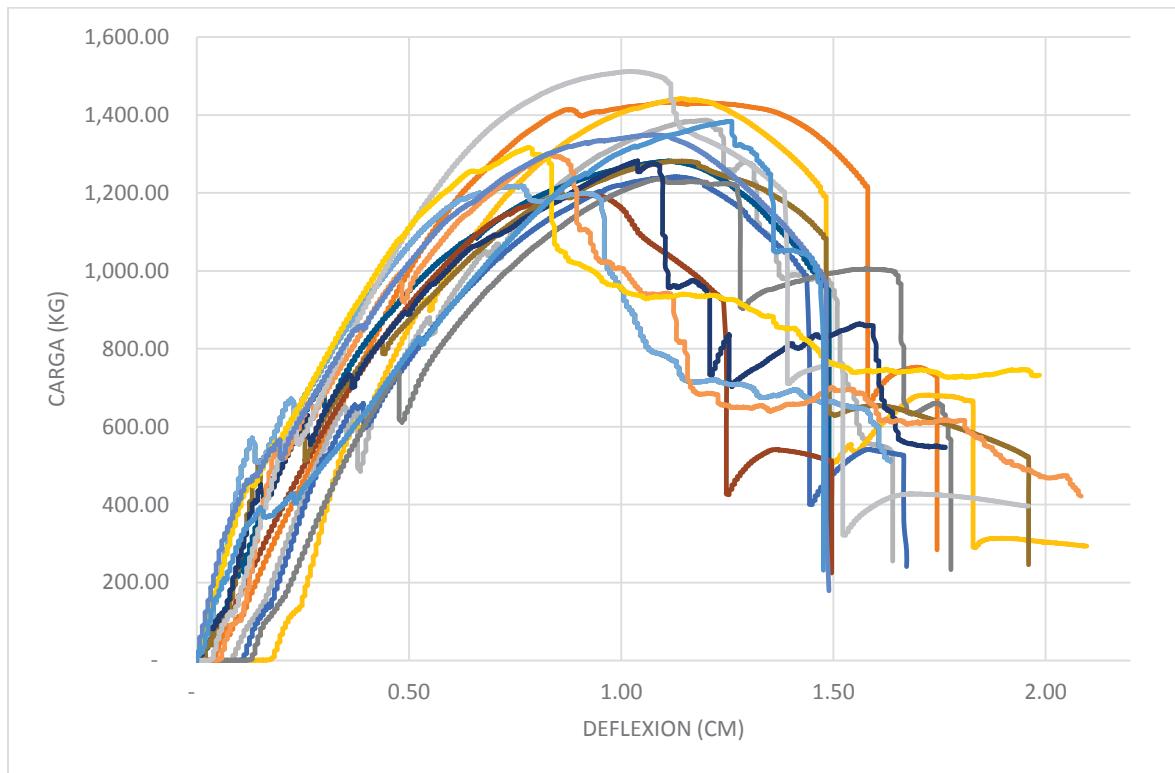


Gráfico 13. Curvas de cada ensayo, Carga (kg) – Deflexión (cm).

Analizando las curvas del ensayo de flexión, se obtiene el cuadro resumen, que muestra las cargas máximas que soportaron las viguetas pre esforzadas, con sus respectivas deflexiones.



Tabla 40. Prueba a flexión de viguetas pre esforzadas con la maquina universal.

| Muestra | Carga Máxima (Kg) | Deflexión Máxima (cm) |
|---------|----------------------|--------------------------|
| M2-9 | 1,432.60 | 1.74 |
| M2-8 | 1,386.81 | 1.64 |
| M2-7 | 1,441.98 | 2.10 |
| M2-6 | 1,240.79 | 1.67 |
| M2-5 | 1,281.68 | 1.49 |
| M2-4 | 1,193.48 | 1.50 |
| M2-3 | 1,235.59 | 1.78 |
| M2-2 | 1,281.68 | 1.96 |
| M2-1 | 1,282.09 | 1.76 |
| M1-9 | 1,217.44 | 1.63 |
| M1-8 | 1,301.26 | 2.08 |
| M1-7 | 1,180.63 | 1.39 |
| M1-6 | 1,407.41 | 1.44 |
| M1-5 | 1,320.25 | 1.71 |
| M1-4 | 1,511.53 | 1.96 |
| M1-3 | 1,316.86 | 1.99 |
| M1-2 | 1,348.78 | 1.49 |
| M1-1 | 1,383.65 | 1.48 |

7.3.2. Prueba de deflexión en campo.

El laboratorio de materiales de la escuela profesional de ingeniería civil no posee con una máquina para realizar ensayos a flexión con muestras de más de un metro de longitud, por este motivo se simuló un ensayo de flexión en campo siguiendo la metodología que utiliza la empresa Vipret para ensayar las viguetas pre esforzadas que esta fabrica (Vipret, s.f.).

PROCEDIMIENTO

1. Se procede al armado de dos viguetas pre esforzadas simulando la instalación de un metro cuadrado de losa sobre dos apoyos simples separados cuatro metros.



2. Colocar una superficie que asegure la transmisión de cargas sobre las viguetas pre esforzadas, puede ser una pequeña capa de concreto o de cualquier otro material.
 3. Para controlar las deflexiones se colocan dos cuerdas que marquen la horizontalidad entre los apoyos, sobre las cuales se harán las mediciones respectivas.
 4. Empieza el proceso de carga sobre las viguetas pre esforzadas con bolsas de cemento de 42.5 Kg cada una, simulando una carga distribuida, a medida que se aumenta la carga se realizan las mediciones de deflexiones en ambas viguetas.
 5. Luego de ensayar las viguetas pre esforzadas hasta la carga de diseño se procede a la etapa de descarga midiendo las deflexiones.
 6. Una vez se tenga las viguetas pre esforzadas descargadas completamente, se procede a ensayar las viguetas pre esforzadas hasta la resistencia ultima, esto quiere decir que se cargan las viguetas hasta su ruptura controlando siempre las deflexiones.
- Siguiendo la metodología planteada por la empresa Vipret (Vipret, s.f.) y evaluando los materiales con los que se cuenta en nuestro medio a continuación se presenta el ensayo de campo de las viguetas pre esforzadas fabricadas con agregados de la zona de Cusco.

En primer lugar, se fabricaron dos caballetes de acero para utilizarlos como apoyos de las viguetas, los caballetes estaban colocados a 4 metros y estos tenían 0.70 metros de ancho para simular el espaciamiento de 0.50 metros entre viguetas y conseguir un metro cuadrado de área tributaria.



Figura 81. Fabricación de caballetes metálicos.

- Colocación de viguetas pre esforzadas distanciadas 0.5 metros entre ejes, la superficie de contacto elegida fue una cama de madera la cual sirvió de transmisor de cargas entre las bolsas de cemento y las viguetas, como unidad de carga se utilizó bolsas de cemento YURA de 42.5 kg cada una.



Figura 82. Colocación de las viguetas pre esforzadas.

- Dos cuerdas fueron sujetadas a los caballetes para marcar la horizontalidad de las viguetas pre esforzadas, con ayuda de una regla métrica medimos la deflexión de la viga en relación a las cuerdas horizontales.



Figura 83. Deflexión de las viguetas pre esforzadas.

- Teniendo en cuenta la resistencia para la cual fueron diseñadas las viguetas se midió la deflexión final de diseño tal como indica el ensayo de campo tomado como referencia.



Figura 84. Deflexión de diseño.



- Una vez descargada completamente la viguela pre esforzada y haber medido la deflexión, se cargó completamente superando la resistencia de diseño y midiendo las deflexiones correspondientes.



Figura 85. Carga de bolsas superando la resistencia de diseño.

- Continuamos con la adición de bolsas de cemento sobre las viguetas pre esforzadas, para finalmente presenciar su ruptura con un total de 24 bolsas de cemento YURA de 42.5 Kg cada una. Esto equivale a 1056 Kg.



Figura 86. Ruptura de las viguetas pre esforzadas.

- Como resultado de la ruptura se obtiene la sección que se aprecia en la figura claramente se aprecian los tres refuerzos de tracción colocados en la parte inferior y el refuerzo a compresión colocado en la parte superior de la viguela.



Figura 87. Falla del acero en las viguetas pre esforzadas.



En el siguiente cuadro se detalla el proceso de carga y la deflexión medida en las viguetas pre esforzadas.

Tabla 41. Carga de viguetas pre esforzadas.

| PROCESO DE CARGA | | | | |
|---------------------|---------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| Nº <i>BOLSAS</i> | CARGA (kg) | DEFLEXIÓN 1 (cm) | DEFLEXIÓN 2 (cm) | DEFLEXIÓN PROMEDIO (cm) |
| 0 | 36.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 14 | 631.00 | 2.50 | 2.00 | 2.25 |
| 16 | 716.00 | 3.40 | 2.60 | 3.00 |
| 17 | 758.50 | 4.00 | 3.00 | 3.50 |
| 19 | 843.50 | 5.40 | 4.30 | 4.85 |
| 23 | 1013.50 | 9.90 | 10.80 | 10.35 |
| 24 | 1056.00 | RUPTURA | RUPTURA | RUPTURA |

A continuación, se detalla el proceso de descarga y las deflexiones correspondientes de las viguetas pre esforzadas.

Tabla 42. Descarga en las viguetas pre esforzadas.

| PROCESO DE DESCARGA | | | | |
|---------------------|---------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| Nº <i>BOLSAS</i> | CARGA (kg) | DEFLEXIÓN 1 (cm) | DEFLEXIÓN 2 (cm) | DEFLEXIÓN PROMEDIO (cm) |
| 14 | 631.00 | 4.80 | 4.10 | 4.45 |
| 11 | 503.50 | 4.10 | 3.60 | 3.85 |
| 7 | 333.50 | 3.50 | 3.40 | 3.45 |
| 6 | 291.00 | 3.00 | 3.20 | 3.10 |
| 4 | 206.00 | 2.30 | 3.10 | 2.70 |
| 0 | 36.00 | 1.50 | 3.00 | 2.25 |



CAPÍTULO VIII

8. ESTUDIO DE MERCADO

Se analizan los diferentes actores involucrados en el mercado, como los proveedores, competidores y consumidores.

8.1.1. Análisis histórico del mercado

La ciudad de Cusco nunca tuvo una planta de fabricación de viguetas pre esforzadas, históricamente la única empresa de ventas de viguetas pre esforzadas era la boliviana Pretensa la cual se retiró del mercado de ventas de viguetas pre esforzadas en el año 2012, esto dejó un mercado completamente libre de competencia para la venta de este producto, es por eso que a inicios del año 2017 la empresa Supermix con sede en la ciudad de Arequipa empezó con su comercialización.

8.1.2. Proveedores

Los proveedores están conformados por las empresas comercializadoras de acero de alta resistencia, y por las empresas que venden cemento.

Dentro de estas tenemos a:

- **Prodac:** Es una empresa de soluciones de alambre de acero, con sede en el Callao, Perú. Emplean cerca de 800 personas, y atienden los mercados nacionales y de exportación. En Prodac brindan soluciones de alambre de acero a muchos sectores, como el de Construcción, Agricultura, Minería, Infraestructura e Industrial, con una amplia gama de productos, tales como gaviones, mallas, alambre de púas, clavos y alambre galvanizado. (PRODAC, s.f.).

Esta empresa se especializa en la venta de acero de alta resistencia con diferentes contenidos de carbono utilizados en pretensados y postensados, pero su venta es a nivel industrial, la cantidad mínima de venta de acero de alta resistencia es de 1tn, esto no es conveniente para el fin de este trabajo de investigación.

- **ArcelorMittal:** es el principal productor siderúrgico y minero a escala mundial, presente en 60 países, y con una plantilla de 210.000 empleados. Con instalaciones industriales en más de 19 países, dispone de una capacidad de



producción anual de 114 millones de toneladas de acero líquido. (ARCELORMITTAL, s.f.).

Esta empresa no tiene agencias de ventas en nuestro país, el lugar más cercano de venta es en la ciudad de La Paz – Bolivia, esta empresa comercializa acero de alta resistencia en rollos de 150-200kg esta cantidad es mucho más accesible para el estudio de factibilidad que se desarrolla en este trabajo de investigación.

- **Yura:** Hace 50 años se constituyó Yura S.A., para ser uno de los ejes de desarrollo más importantes de la región sur del país. Yura está especializada en la producción y comercialización de Cemento de alta calidad, realiza su distribución principalmente a través de la Red de Negocios AConstruir, convirtiéndose en líder de su mercado de influencia. (YURA, s.f.)

Esta empresa fabricante de cemento es la más importante en el sur del Perú, pertenece al grupo Gloria, dentro del cual se encuentra concretos Supermix y viguetas Supermix.

8.1.3. Competencia

Haciendo una observación objetiva del mercado de la construcción en la ciudad de Cusco, encontramos solo un proveedor de viguetas Pre esforzadas. La empresa **Supermix** es la única vendedora de este producto y por ende tiene el monopolio en su comercialización, antiguamente la empresa boliviana Pretensa también expendía este producto en la ciudad de Cusco, pero hace tres años se retiró del mercado.

Las viguetas pre esforzadas de Supermix son fabricadas industrialmente en una planta automatizada y traídas desde Arequipa, en la ciudad de Cusco no existe una planta de fabricación de estos productos.

A nivel nacional existen varias empresas fabricantes de viguetas pre esforzadas, tal es el caso de:

- **Concremax (ex Firth):** CONCREMAX S.A. se ha consolidado como uno de los principales proveedores de soluciones en concreto y agregados para los sectores vivienda, oficinas, minería e infraestructura a nivel nacional.

Fundada en 1995 como Firth Industries Perú, desde el inicio de nuestras operaciones, el compromiso hacia nuestros clientes nos ha llevado a entregar productos y servicios de calidad, para lo cual nos regimos bajo los más altos estándares internacionales de la industria.



En CONCREMAX desarrollamos la producción, distribución y bombeo de concreto premezclado. Ofrecemos adicionalmente lasas aligeradas TECHOMAX y mezclas secas embolsadas de Concreto, Mortero y Tarajeo. (Firth, s.f.)

■ **Pretensa:** PRETENSA, INDUSTRIA E INGENIERIA PARA LA CONSTRUCCION fue fundada el 5 de junio de 1992, siendo una industria boliviana de ingeniería especializada en diversos productos para la construcción.

Hoy Pretensa opera a lo largo de todo el territorio de Bolivia, en obras perdurables que han contribuido en forma decisiva al desarrollo nacional e internacional.

Con más de 22 años de existencia, Pretensa Ltda. puede constatar con orgullo que ha respondido siempre con capacidad, participando con éxito en la mayoría de los grandes proyectos civiles demostrando eficacia y versatilidad en la ejecución de los trabajos. Estos logros han sido posibles gracias a la calidad humana y a la capacidad técnica de su personal. Su característica distintiva más relevante se encuentra en una gestión empresarial basada en la administración racional y tecnificada del recurso humano. (Pretensa, s.f.).

■ **Vipret:** es una empresa dedicada a la fabricación de viguetas pretensadas de cuña invertida diseño Roth y Ladrillos de Concreto.

VIPRET se encuentra comercializando viguetas pretensadas desde el año 2006. En el año 2008, debido a la falta de abastecimiento de las bovedillas tradicionales de arcilla, VIPRET comenzó a fabricar sus propias bovedillas de concreto y ladrillos mixtos para techos. (Vipret, s.f.).

■ **Pacasmayo:** Cementos Pacasmayo, conocedor que hoy en día las constructoras requieren emplear sistemas constructivos innovadores que contribuyan a reducir los plazos de ejecución y optimizar costos garantizando la calidad de las obras, decidió implementar en el Norte del Perú un servicio de Sistema Prefabricado estructural para lasas aligeradas bajo la marca SOLTEK, el cual presenta ventajas reconocidas frente al sistema tradicional de construcción de lasas en las edificaciones.

El Sistema Vigueta Bovedilla es un sistema prefabricado estructural que, mediante el uso de viguetas de concreto, ladrillos bovedillas y bandejas permiten la construcción de todo tipo de lasas aligeradas que se presentan en las edificaciones. (Pacasmayo, s.f.).

La Tabla 43, muestra la localización de dichas empresas y el mercado en el que operan.



Tabla 43. Empresas que fabrican viguetas pre esforzadas y el mercado en el que operan.

| | Ubicación | Mercado |
|------------------|-------------|--------------------------|
| Concremax | Lima | Lima |
| Pretensa | Bolivia | Bolivia, Puno y Arequipa |
| Vipret | Lima | Lima |
| Pacasmayo | La Libertad | La Libertad, Lima |
| Supermix | Arequipa | Arequipa, Lima y Cusco |

El único vendedor de viguetas pre esforzadas en la ciudad de Cusco es la empresa Supermix, cuya planta de fabricación se encuentra en la ciudad de Arequipa, y en nuestra ciudad solo opera la oficina de ventas, esto representa una desventaja ya que al transportar el producto desde otra ciudad genera un costo adicional que suponemos se sobrecarga al precio de venta.

Al ser el único vendedor podemos apreciar que no se explota muy bien el mercado ya que carece de publicidad y las construcciones en las que se utilizaron son muy pocas.

8.1.4. Características de las viguetas pre esforzadas Supermix

La empresa Supermix cuenta con cinco tipos de viguetas pre esforzadas, los cuales varían de acuerdo a la longitud que se requiera, los precios de venta y las características de sus productos se detallan a continuación:

- Vigueta tipo I: el costo de este producto es de S/. 15.48 incluido IGV, el concreto utilizado para su fabricación es de $f'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ y consta de 3 cables de 4mm colocados en la siguiente posición:

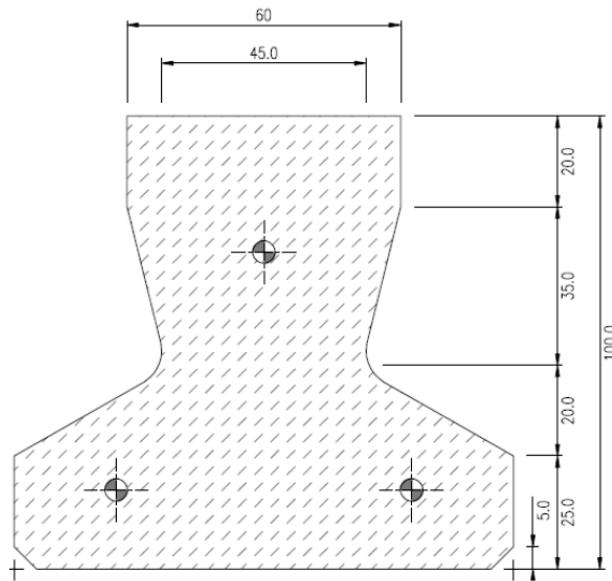


Figura 88. Vigueta Tipo I

Fuente: Supermix

- Vigueta tipo II: el costo de este producto es de S/. 16.53 incluido IGV, el concreto utilizado para su fabricación es de $F'c = 350 \text{ kg/cm}^2$ y consta de 4 cables de 4mm colocados en la siguiente posición:

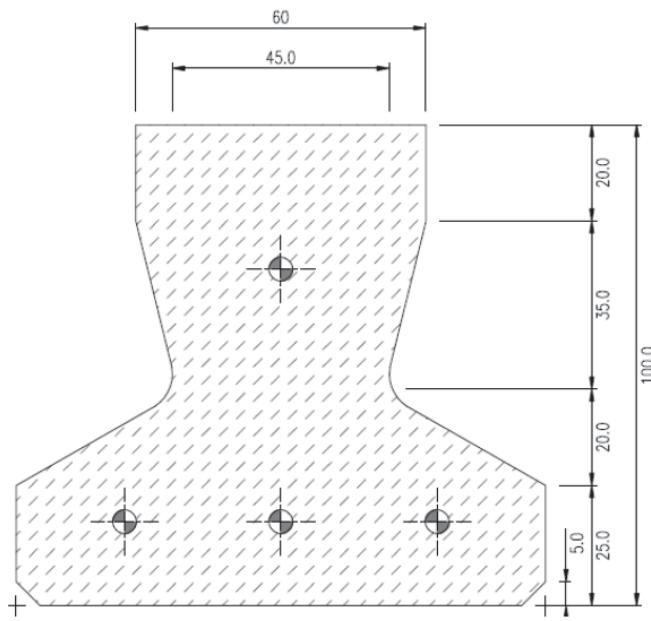


Figura 89. Vigueta tipo II

Fuente: Supermix

- Vigueta tipo III: el costo de este producto es de S/. 17.59 incluido IGV, el concreto utilizado para su fabricación es de $F'c = 420 \text{ kg/cm}^2$ y consta de 5 cables de 4mm colocados en la siguiente posición:

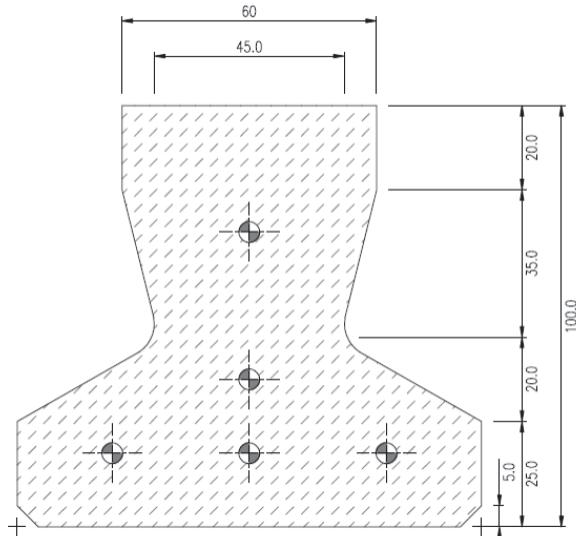


Figura 90. Vigueta tipo III

Fuente: Supermix

- Vigueta tipo IV: el costo de este producto es de S/. 18.76 incluido IGV, el concreto utilizado para su fabricación es de $F'c = 420 \text{ kg/cm}^2$ y consta de 3 cables de 5mm colocados en la siguiente posición:

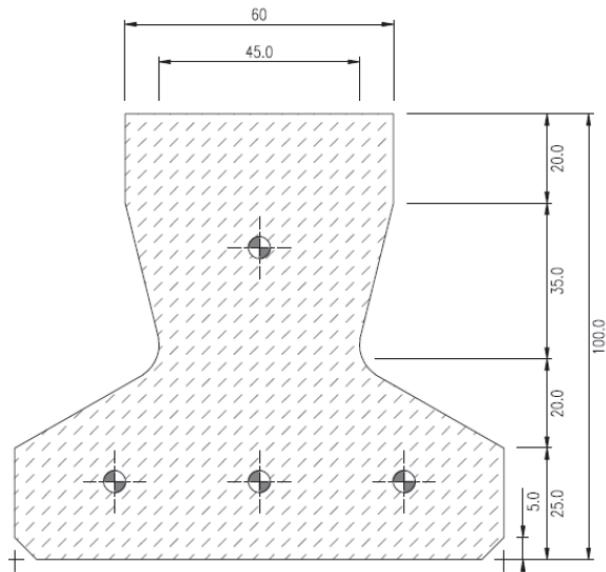


Figura 91. Vigueta tipo IV

Fuente: Supermix

- Vigueta tipo V: el costo de este producto es de S/. 19.81 incluido IGV, el concreto utilizado para su fabricación es de $F'c = 500 \text{ kg/cm}^2$ y consta de 5 cables de 5mm colocados en la siguiente posición:



CAPITULO VIII –ESTUDIO DE MERCADO

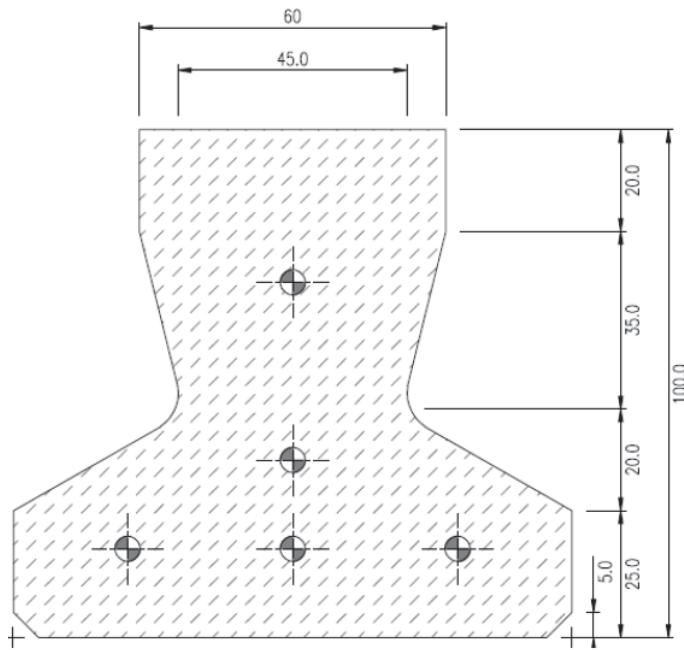


Figura 92. Vigueta tipo V

Fuente: Supermix

Estas viguetas se utilizan calculando el momento máximo solicitado por la estructura y se compara con el siguiente monograma que ayuda a su selección, en nuestro caso la longitud de diseño es de cuatro metros de longitud libre entre apoyos.

Tabla 44. Viguetas pretensadas @0.60m ($Hl=0.17m$, con bovedilla de arcilla)

Fuente: Supermix

8.1.5. Consumidores

Los consumidores están conformados por las personas que se dedican a la construcción de viviendas simples y multifamiliares, ya que las viguetas pre esforzadas son diseñadas para este fin.

Ya que la producción del PBI en el sector construcción está en alza, al año 2017 como se muestra en la Tabla 45, se prevé que la demanda de este producto sea alta.



Tabla 45. PBI por sectores económicos 2017.

| Cuadro 16 PBI POR SECTORES ECONÓMICOS (Variaciones porcentuales reales) | | | | | | |
|---|--------------|-------------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| | 2014 | 2015 | 2016* | 2016* | 2017* | 2017* |
| | | | RI Dic.15 | RI Mar.16 | RI Dic.15 | RI Mar.16 |
| Agropecuario | 1,9 | 2,8 | 1,6 | 1,6 | 3,7 | 3,7 |
| Agrícola | 0,7 | 1,3 | 0,5 | 0,4 | 3,7 | 3,7 |
| Pecuario | 5,8 | 5,3 | 3,3 | 3,4 | 3,6 | 3,6 |
| Pesca | -27,9 | 15,9 | -1,2 | 1,1 | 27,9 | 25,2 |
| Minería e hidrocarburos | -0,9 | 9,3 | 10,6 | 14,1 | 10,4 | 8,6 |
| Minería metálica | -2,2 | 15,5 | 11,2 | 17,0 | 11,6 | 9,4 |
| Hidrocarburos | 4,0 | -11,5 | 8,1 | 1,0 | 4,6 | 4,6 |
| Manufactura | -3,6 | -1,7 | 1,1 | -1,5 | 4,2 | 4,0 |
| Recursos primarios | -9,3 | 1,7 | -0,1 | 1,0 | 10,6 | 9,4 |
| Manufactura no primaria | -1,5 | -2,7 | 1,5 | -2,2 | 2,5 | 2,5 |
| Electricidad y agua | 4,9 | 6,2 | 6,0 | 7,6 | 5,5 | 5,5 |
| Construcción | 1,9 | -5,9 | 2,5 | 0,0 | 3,5 | 3,5 |
| Comercio | 4,4 | 3,9 | 3,8 | 3,6 | 3,8 | 3,8 |
| Servicios | 5,0 | 4,2 | 3,7 | 3,7 | 3,7 | 3,7 |
| PRODUCTO BRUTO INTERNO | 2,4 | 3,3 | 4,0 | 4,0 | 4,8 | 4,6 |
| Nota: | | | | | | |
| PBI primario | -2,2 | 6,6 | 6,5 | 8,9 | 9,1 | 7,8 |
| PBI no primario | 3,6 | 2,4 | 3,4 | 2,7 | 3,6 | 3,6 |

* Proyección.
RI: Reporte de Inflación.

Fuente: (BCRP, s.f.)

En conclusión, empresas y personas que se dedican al sector construcción utilizarán el producto fabricado en la ciudad de Cusco ya que mostrará una propuesta más económica y será innovadora.

8.2. El Producto

El producto que se ofrecerá será una vigueta pre esforzada con una longitud de cuatro (4) metros y constará de cuatro (4) alambres de alta resistencia colocados como se indica en la Figura 93. Esta es la longitud promedio de las edificaciones utilizadas como viviendas en la ciudad de Cusco, lo principal de este producto es que será fabricado con agregados de la zona de Cusco, por ende, será más económico que la competencia.

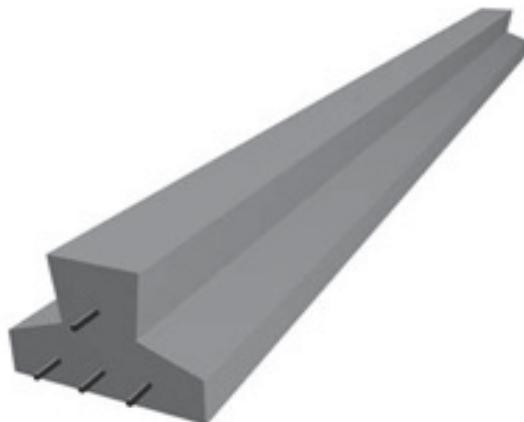


Figura 93. Vigueta pre esforzada típica.



8.3. Análisis de la demanda

La metodología utilizada para el análisis de la demanda de viguetas pre esforzadas en la ciudad del Cusco fue el uso de encuestas realizadas a varios especialistas en construcción (Ingenieros Civiles, ver Anexo 1) y se les realizó una encuesta con el formato que se muestra en la Figura 94.

8.3.1. Desarrollo del modelo de encuesta

- Históricamente el mercado de viguetas pre esforzadas en la ciudad de Cusco fue muy reducido, y desde la desaparición de la empresa Pretensa, la utilización de este producto fue casi nula, es por eso que surge la duda hacia los encuestados de ¿Utilizó alguna vez viguetas pre esforzadas en la construcción?
- Tal como se describió anteriormente nunca existió una empresa fabricante de viguetas pre esforzadas en la ciudad de Cusco, se pretende medir el grado de información que tienen nuestros profesionales cusqueños acerca de las viguetas pre esforzadas con la pregunta ¿Conoce usted empresas fabricantes de viguetas pre esforzadas en la ciudad de Cusco?
- Debido a la escasez de este producto en el mercado cusqueño durante varios años, deseamos conocer si los profesionales que laboran en nuestra ciudad conocen del uso de esta tecnología en alguna etapa de su vida profesional, es por eso se tiene la inquietud ¿Conoce usted alguna obra en la que utilizaron viguetas pre esforzadas?
- Viendo el mercado a futuro y teniendo en cuenta que este es un trabajo de investigación deseamos saber si nuestro producto estrella sería utilizado por los profesionales que laboran en nuestra ciudad en el caso supuesto que sean fabricados masivamente, es por eso que la siguiente pregunta de la encuesta formulada es la siguiente: Si se fabricarían viguetas pre esforzadas en la ciudad de Cusco ¿Usted las utilizaría?



- Finalmente, con el afán de justificar el escaso uso de las viguetas pre esforzadas en la ciudad de Cusco se formuló la siguiente pregunta ¿Por qué cree usted que las viguetas pre esforzadas no se utilizan en construcciones en la ciudad de Cusco?

| RECOLECCION DE DATOS PARA ESTUDIO DE MERCADO | |
|--|-----------|
| Nombre:..... | CIP:..... |
| Marque con una cruz o aspa y responda a las siguientes preguntas: | |
| 1. ¿Utilizó alguna vez viguetas pre esforzadas en la construcción? | |
| <input type="checkbox"/> Si | |
| <input type="checkbox"/> No | |
| Por favor especifique en que obra y el proveedor: | |
| 2. ¿Conoce usted empresas fabricantes de viguetas pre esforzadas en la ciudad de Cusco? | |
| <input type="checkbox"/> Si | |
| <input type="checkbox"/> No | |
| Por favor especifique el nombre del proveedor: | |
| 3. ¿Conoce usted alguna obra en la que utilizaron viguetas pre esforzadas? | |
| <input type="checkbox"/> Si | |
| <input type="checkbox"/> No | |
| Por favor especifique el nombre de la obra: | |
| 4. Si se fabricarían viguetas pre esforzadas en la zona de Cusco ¿usted las utilizaría? | |
| <input type="checkbox"/> Si | |
| <input type="checkbox"/> No | |
| ¿Por qué? | |
| 5. ¿Por qué cree usted que las viguetas pre esforzadas no se utilizan en las construcciones en la ciudad de Cusco? | |
| | |
| | |
| | |
| | |

Figura 94. Formato de encuesta.



Se realizó esta encuesta a un total de 50 ingenieros civiles y los resultados se muestran en las Tablas 46 y 47.

Tabla 46. Resultado de encuestas

| Pregunta | Si | No | Total |
|---|----|----|-----------|
| ¿Utilizo alguna vez viguetas pre esforzadas en la construcción? | 12 | 38 | 50 |
| ¿Conoce usted empresas fabricantes de viguetas pre esforzadas en la ciudad del Cusco? | 21 | 29 | 50 |
| ¿Conoce usted alguna obra en la que utilizaron viguetas pre esforzadas? | 13 | 37 | 50 |
| Si se fabricaran viguetas pre esforzadas en la zona de Cusco ¿Usted las utilizaría? | 43 | 7 | 50 |

Ver anexo 1

Tabla 47. Resultado de encuestas en porcentaje

| Pregunta | Si (%) | No (%) | Total (%) |
|---|--------|--------|-------------|
| ¿Utilizo alguna vez viguetas pre esforzadas en la construcción? | 24% | 76% | 100% |
| ¿Conoce usted empresas fabricantes de viguetas pre esforzadas en la ciudad del Cusco? | 42% | 58% | 100% |
| ¿Conoce usted alguna obra en la que utilizaron viguetas pre esforzadas? | 26% | 74% | 100% |
| Si se fabricaran viguetas pre esforzadas en la zona de Cusco ¿Usted las utilizaría? | 86% | 14% | 100% |

Ver anexo 1

8.4. Análisis de costo de fabricación de las viguetas pre esforzadas.

Luego de evaluar las características de la viga pre esforzada, es necesario analizar su costo, ya que un costo menor o igual implica la colocación de este producto en el mercado. Para el análisis del costo de elaboración, se tomará en cuenta, cada factor que influye, así como los materiales, mano de obra y equipos.



La cantidad de materiales, mano de obra y equipos que se muestra, son para elaborar 3 viguetas de 9 m cada uno (27ml/día de rendimiento). Para el análisis final se realizará el costo unitario por metro lineal de vigueta.

8.4.1. Materiales

Para la elaboración de las viguetas pre esforzadas, se utilizaron los siguientes materiales en las cantidades que se muestran en la Tabla 48.

Tabla 48. Materiales para la elaboracion de las viguetas pre esforzadas.

| MATERIALES | CANTIDAD | UND. |
|--------------------|----------|------|
| Cemento | 180.00 | Kg |
| Agua | 54.20 | Kg |
| Arena | 474.73 | Kg |
| Piedra | 249.89 | Kg |
| Aditivo Ulmen W-73 | 0.31 | Kg |

8.4.2. Mano de obra

En el caso de mano de obra, se vio por conveniente para el análisis usar una cuadrilla de 1 operarios y 2 peones. Que podrían realizar el trabajo sin ningún inconveniente.

8.4.3. Equipo

Se utilizaron los siguientes equipos para la fabricación de las viguetas pre esforzadas:

- Vibradora.
- Mezcladora.
- Amoladora.
- Maquina artesanal para pre esforzar.

Se presenta el costo por metro lineal de vigueta pre esforzada, como muestra en la Tabla 49.



Tabla 49. Análisis de costo unitario de elaboración de viguetas pre esforzadas por metro lineal (Rendimiento 27 ml/dia)

| CANT. | DETALLE | | COSTO UNITARIO | COSTO TOTAL |
|---|---------|--------------------------------------|----------------|--------------|
| MANO DE OBRA | | | | 11.16 |
| 1.00 | 0.30 | Operarios | 14.74 | 4.37 |
| 2.00 | 0.59 | Peón | 11.46 | 6.79 |
| MATERIALES | | | | 3.01 |
| 0.103 | bl. | Cemento | 20.34 | 2.10 |
| 0.001 | m3 | Agua | 2.00 | 0.01 |
| 0.004 | m3 | Arena | 50.85 | 0.22 |
| 0.002 | m3 | Piedra | 42.37 | 0.10 |
| 0.018 | Gal. | Aditivo Ulmen W-73 | 21.19 | 0.39 |
| 1.000 | m. | Alambre de alta resistencia | 0.20 | 0.20 |
| MAQUINARIA Y EQUIPO | | | | 10.13 |
| 3% | | Herramientas | | 0.33 |
| 1.00 | 0.30 | Vibradora | 8.47 | 2.51 |
| 1.00 | 0.30 | Mezcladoras | 8.47 | 2.51 |
| 1.00 | 0.30 | Amoladoras | 3.39 | 1.00 |
| 1.00 | 0.30 | Maquina artesanal para pre esforzar. | 12.71 | 3.77 |
| PRECIO UNITARIO POR METRO LINEAL (sin IGV) | | | | 24.29 |
| PRECIO UNITARIO POR METRO LINEAL (con IGV) | | | | 28.67 |

De la tabla anterior, se observa que el costo por metro lineal de vigueta es de S/. 28.67, siendo un valor por encima del de la competencia (Supermix). Pero se observa que el rendimiento de las viguetas es de tan solo 27 ml/día. Pero para reducir el costo de las viguetas pre esforzadas, se podría aumentar el rendimiento.



En la siguiente tabla se muestra un análisis de costo, con el doble de rendimiento.

Tabla 50. Análisis de costo unitario de elaboración de viguetas pre esforzadas por metro lineal (Rendimiento 54ml/día)

| CANT. | DETALLE | | COSTO UNITARIO | COSTO TOTAL |
|---|---------|-------------------------------------|----------------|--------------|
| MANO DE OBRA | | | | 7.28 |
| 1.00 | 0.15 | Operario | 14.74 | 2.18 |
| 3.00 | 0.44 | Peón | 11.46 | 5.09 |
| MATERIALES | | | | 3.01 |
| 0.103 | bl. | Cemento | 20.34 | 2.10 |
| 0.001 | m3 | Agua | 2.00 | 0.01 |
| 0.004 | m3 | Arena | 50.85 | 0.22 |
| 0.002 | m3 | Piedra | 42.37 | 0.10 |
| 0.018 | gl. | Aditivo Ulmen W-73 | 21.19 | 0.39 |
| 1.000 | m. | Alambre de alta resistencia | 0.20 | 0.20 |
| MAQUINARIA Y EQUIPO | | | | 5.11 |
| 3% | | Herramientas | | 0.22 |
| 1.00 | 0.15 | Vibradora | 8.47 | 1.26 |
| 1.00 | 0.15 | Mezcladoras | 8.47 | 1.26 |
| 1.00 | 0.15 | Amoladoras | 3.39 | 0.50 |
| 1.00 | 0.15 | Maquina artesanal para pre esforzar | 12.71 | 1.88 |
| PRECIO UNITARIO POR METRO LINEAL (sin IGV) | | | | 15.40 |
| PRECIO UNITARIO POR METRO LINEAL (con IGV) | | | | 18.17 |

En la Tabla 50, se muestra que al duplicar el rendimiento (Rend. = 54ml/día), el costo de la elaboración de las viguetas pre esforzadas es S/. 18.17 con IGV, reduciendo el costo en S/. 10.50, con respecto a lo que se muestra en la Tabla 49 (Rend. = 27ml/día), siendo una reducción del costo en 36.6 %. Esto demuestra que, al aumentar el rendimiento, se puede disminuir el costo de elaboración de las viguetas pre esforzadas.



8.5. Análisis de la situación proyectada

En el caso de aperturar una planta de elaboración de viguetas pre esforzadas se espera obtener un producto que pueda competir con la única empresa que existe en el mercado en este momento, esto debido a los resultados del análisis de la demanda y del costo de fabricación y siguiendo los consejos que se desprenden de este trabajo de investigación. Todo esto dependería del tipo de inversión inicial que se quisiera hacer, como se explicó anteriormente se requiere una producción masiva para lograr su rentabilidad.



CAPÍTULO IX

9. ANALISIS DE RESULTADOS

9.1. Resultados de agregados.

9.1.1. Tablas resumen por cantera estudiada

Luego de haber realizado los ensayos de laboratorio de los agregados finos de Vilcabamba y agregados gruesos de Huandar de acuerdo a las normas, se obtuvo los siguientes cuadros resúmenes tanto del agregado grueso como del agregado fino.

Tabla 51. Propiedades mecanicas de agregados gruesos cantera HUANDAR

ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

CUADRO RESUMEN

TESIS: “ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA ELABORACION DE VIGUETAS PRE ESFORZADAS CON AGREGADOS DE LA ZONA DE CUSCO”

I) Datos Generales

CANTERA: HUANDAR

II) Datos Técnicos - Análisis agregado grueso

| | | |
|---|-------|-------------------|
| Peso específico | 2.64 | |
| Porcentaje de absorción | 1.17 | % |
| Peso Unitario Suelto | 1.444 | Kg/m ³ |
| Peso unitario compactado | 1631 | Kg/m ³ |
| Cantidad de material fino que pasa el tamiz N°200 | 1.1 | % |
| Contenido de Humedad | 1.11 | % |
| Módulo de fineza | 5.08 | |

Tabla 52. Propiedades mecanicas de agregados finos cantera VILCABAMBA



ESCUELA PROFESIONAL DE INGENIERIA CIVIL

CUADRO RESUMEN

TESIS: “ESTUDIO DE FACTIBILIDAD PARA LA ELABORACION DE
VIGUETAS PRE ESFORZADAS CON AGREGADOS DE LA ZONA
DE CUSCO”

I) Datos Generales

CANTERA:

VILCABAMBA

II) Datos Técnicos - Análisis agregado fino

| | | |
|---|-------|-------------------|
| Peso específico | 2.574 | |
| Porcentaje de absorción | 2.886 | % |
| Peso Unitario Suelto | 1.399 | Kg/m ³ |
| Peso unitario compactado | 1.578 | Kg/m ³ |
| Cantidad de material fino que pasa el tamiz N°200 | 5.72 | % |
| Contenido de Humedad | 4.77 | % |
| Módulo de fineza | 4 | |

Las propiedades determinadas en el análisis granulométrico resultan propicias para elaborar concreto de alta resistencia y hacerlo a gran escala porque son canteras nuevas no explotadas y eso garantizaría una continuidad en la producción.

9.1.2. Tabla resumen por cantera de agregado fino

A continuación, mostramos un cuadro resumen comparativo de las propiedades de las canteras de agregado fino estudiados anteriormente, con nuestros resultados obtenidos en laboratorio.

Tabla 53. Tabla comparativa de agregado fino



| Propiedades | Vilcabamba | Huambutio | Kunyac | San Salvador Pisaq |
|---|------------|-----------|--------|-----------------------|
| Peso específico | 2.57 | 2.51 | 2.60 | 2.54 |
| Porcentaje de absorción (%) | 2.88 | 4.76 | 2.29 | 4.54 |
| Peso Unitario Suelto (kg/m ³) | 1.39 | 1.59 | 1.46 | 1.36 |
| Peso unitario compactado (kg/m ³) | 1.58 | 1.72 | 1.60 | 1.57 |
| Cantidad de material fino que pasa el tamiz N°200 | 5.72 | 8.21 | 1.46 | 2.70 |
| Contenido de Humedad (%) | 4.77 | 2.96 | 3.81 | 7.39 |
| Módulo de fineza | 4 | 3.44 | 1.83 | 1.28 |

Como se aprecia en la tabla anterior, las propiedades físico mecánicas del agregado fino de Vilcabamba son muy parecidas a las propiedades de los agregados finos utilizados para la elaboración de concreto en la ciudad de Cusco.

El peso específico del agregado de Vilcabamba representa un promedio entre todos los agregados antes mencionado.

El porcentaje de absorción no es tan alto comparado a los demás agregados, esto lo hace ideal para la producción de concreto en grandes cantidades.

Por lo demás, el peso unitario suelto, el peso unitario compactado y la cantidad de material fino que pasa el tamiz 200 son muy parecidos y se pueden tomar como referencia para futuros diseños.

Finalmente, el contenido de humedad de 4.77% no es un valor tan alto como el agregado de Pisaq.



Tabla 54. Granulometría del agregado fino cantera VILCABAMBA

| GRANULOMETRIA | | | | | | HUSO: | Arena Gruesa |
|---------------|-----------------------|--------------------------|-----------------|-------------------|----------------|--------|-----------------|
| TAMIZ | DIAMETRO DEL TAMIZ | PESO REtenido (gr) | (%) REtenido | (%) RET. ACUM. | (%) Q' PASA | MINIMO | MAXIMO |
| 1/2" | 12.7 | 184 | 7.3 | 7.3 | 92.7 | 100 | 100 |
| 3/8" | 9.525 | 206 | 8.17 | 15.48 | 84.52 | 100 | 100 |
| N° 4 | 4.75 | 466 | 18.49 | 33.97 | 66.03 | 100 | 95 |
| N° 8 | 2.36 | 325 | 12.9 | 46.87 | 53.13 | 100 | 80 |
| N° 16 | 1.18 | 220 | 8.73 | 55.6 | 44.4 | 85 | 50 |
| N° 30 | 0.59 | 255 | 10.12 | 65.71 | 34.29 | 60 | 25 |
| N° 50 | 0.297 | 526 | 20.87 | 86.59 | 13.41 | 30 | 10 |
| N° 100 | 0.149 | 243 | 9.64 | 96.23 | 3.77 | 10 | 2 |
| FONDO | 0 | 95 | 3.77 | 100 | 0 | | |
| SUMA | | 2520 | 92.7 | | | | |
| M.F = 4.00 | | | | | | | |

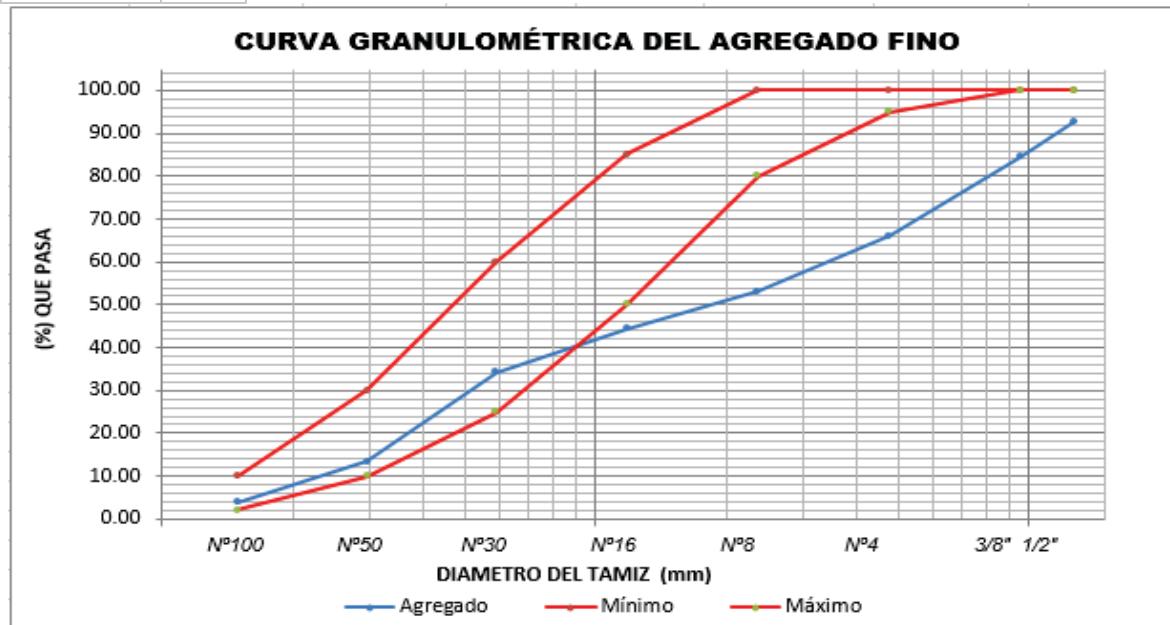


Gráfico 14. Curva granulométrica del agregado fino.



9.1.3. Tabla resumen por cantera agregado grueso

A continuación, mostramos un cuadro resumen comparativo de las propiedades de las canteras de agregado grueso estudiadas anteriormente y los agregados estudiados en este trabajo de investigación.

Tabla 55. Tabla resumen agregado grueso

| Propiedades | Huandar | Huilque | Zurite | Vicho |
|---|---------|---------|--------|-------|
| Peso específico | 2.64 | 2.63 | 2.65 | 2.61 |
| Porcentaje de absorción (%) | 1.17 | 2.17 | 1.83 | 3.44 |
| Peso Unitario Suelto (kg/m ³) | 1.444 | 1.363 | 1.403 | 1.589 |
| Peso unitario compactado (kg/m ³) | 1631 | 1.548 | 1.581 | 1.589 |
| Cantidad de material fino que pasa el tamiz N°200 (%) | 1.1 | 0.51 | 1.05 | 1.13 |
| Contenido de Humedad (%) | 1.11 | 2.89 | 1.78 | 3.57 |
| Módulo de fineza | 5.08 | 6.67 | 6.46 | 6.76 |

Como se aprecia en la tabla anterior, las propiedades físico mecánicas del agregado grueso de Huandar son muy parecidas a las propiedades de los agregados finos utilizados para la elaboración de concreto en la ciudad de Cusco.

El peso específico del agregado de Huandar representa un promedio entre todos los agregados antes mencionado.

El porcentaje de absorción de 1.17% no es tan alto comparado a los demás agregados, esto lo hace ideal para la producción de concreto en grandes cantidades.

Por lo demás, el peso unitario suelto, el peso unitario compactado y la cantidad de material fino que pasa el tamiz 200 son muy parecidos y se pueden tomar como referencia para futuros diseños.

Finalmente, el contenido de humedad de 1.11% no es un valor tan alto como el agregado de Vicho.



Tabla 56. Granulometría del agregado grueso cantera HUANDAR.

| GRANULOMETRIA | | | | | | | |
|---------------|--------------------|--------------------|--------------|----------------|-------------|--------|--------|
| TAMIZ | DIAMETRO DEL TAMIZ | PESO RETENIDO (gr) | (%) RETENIDO | (%) RET. ACUM. | (%) Q' PASA | MINIMO | MAXIMO |
| 2" | 50.80 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100 | 100 |
| 1 1/2" | 38.10 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100 | 100 |
| 1" | 25.40 | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 100 | 100 |
| 3/4" | 19.05 | 651.10 | 17.67 | 17.67 | 82.33 | 100 | 90 |
| 1/2" | 12.70 | 2107.50 | 57.21 | 74.88 | 25.12 | 79 | 50 |
| 3/8" | 9.525 | 623.60 | 16.93 | 91.81 | 8.19 | 55 | 20 |
| N° 4 | 4.75 | 285.40 | 7.75 | 99.56 | 0.44 | 10 | 0 |
| N° 8 | 2.36 | 1.70 | 0.05 | 99.60 | 0.40 | 5 | 0 |
| N° 16 | 1.18 | 1.10 | 0.03 | 99.63 | 0.37 | 0 | 0 |
| N° 30 | 0.59 | 5.30 | 0.14 | 99.78 | 0.22 | 0 | 0 |
| N° 50 | 0.297 | 8.20 | 0.22 | 100.00 | 0.00 | 0 | 0 |
| N° 100 | 0.149 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 0.00 | 0 | 0 |
| FONDO | 0.00 | 0.00 | 0.00 | 100.00 | 0.00 | | |
| SUMA | | 3683.9 | 100 | | | | |
| M.F = | | 5.08 | | | | | |

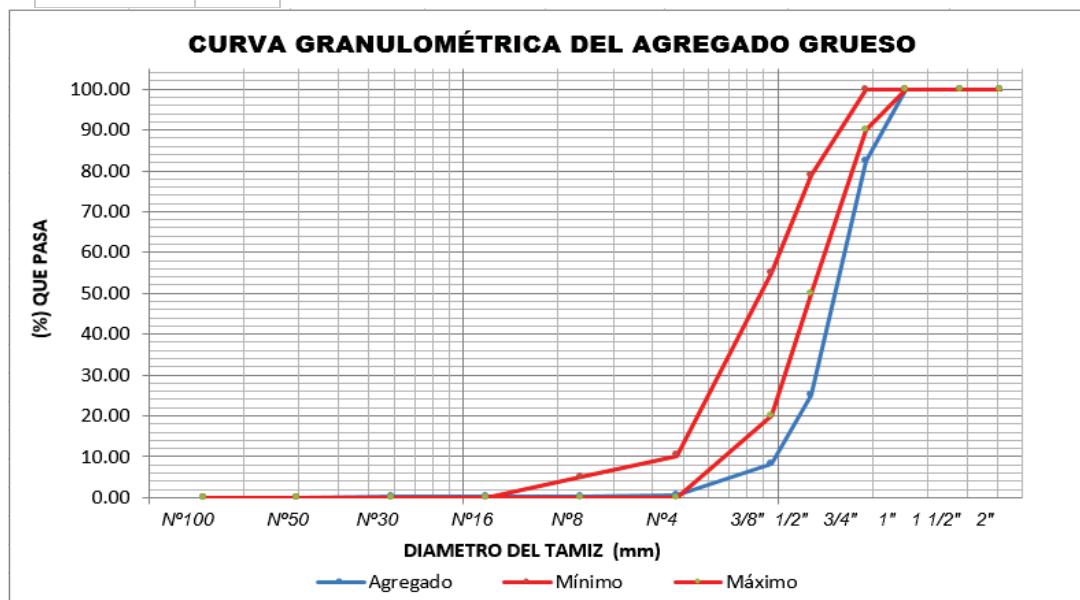


Gráfico 15. Curva granulométrica del agregado grueso de Huandar



Una vez realizada la corrección del material para obtener un agregado homogéneo y que cumpla los requerimientos de la Norma Técnica Peruana (NTP400.037) para tamaño máximo de 1 ½", la curva granulométrica queda como se muestra a continuación:

Tabla 57. Tabla de la granulometría combinada corregida

| Granulometría y proporción de Agregados | | | | | | |
|---|-----------|---------|--------|--------|---------------|-----------------|
| Malla | Combinado | T. máx. | T. med | T. min | Agregado fino | Agregado grueso |
| 1 1/2" | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 | 100.00 |
| 1" | 100.00 | 94.00 | 88.00 | 76.00 | 100.00 | 100.00 |
| 3/4" | 93.81 | 90.00 | 80.00 | 60.00 | 100.00 | 82.33 |
| 1/2" | 69.05 | 84.00 | 69.00 | 48.00 | 92.70 | 25.12 |
| 3/8" | 57.81 | 80.00 | 61.00 | 40.00 | 84.52 | 8.19 |
| # 4 | 43.08 | 66.00 | 48.00 | 24.00 | 66.03 | 0.44 |
| # 8 | 34.68 | 55.00 | 37.00 | 15.00 | 53.13 | 0.40 |
| # 16 | 28.99 | 42.00 | 28.00 | 10.00 | 44.40 | 0.37 |
| # 50 | 8.72 | 19.00 | 11.00 | 3.00 | 13.41 | 0.00 |

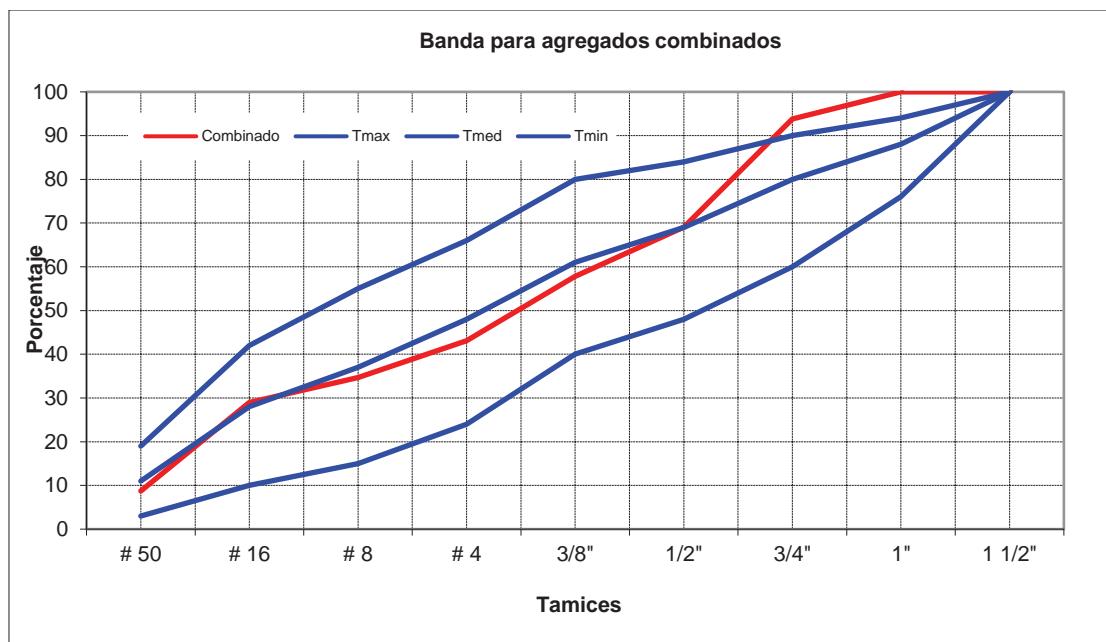


Gráfico 16. Curva granulométrica combinada según Norma Técnica Peruana



Al realizar la combinación de los agregados, la curva obtenida cumple ampliamente con los requerimientos de la normativa, es por eso que se utilizan estos materiales en la fabricación de concreto de alta resistencia para viguetas pre esforzadas.

9.2. Resultados del concreto.

Los resultados del ensayo para determinar la compresión axial de los testigos cilíndricos de concreto se obtuvieron mediante la aplicación del método recomendado en la norma NTP.339.034. HORMIGÓN (CONCRETO): “Método de ensayo normalizado para la determinación de la resistencia a la compresión del concreto, en muestras cilíndricas” y el ACI 318S-05 “Requisitos del reglamento para concreto estructural”. Estos resultados pueden observarse en la Tabla 58.



Tabla 58. Ensayo de testigos cilíndricos de concreto a la edad de 28 días.

| Muestra | Peso (kg) | Diámetro promedio (cm) | Altura (cm) | Resistencia (Kg) | Área en (cm ²) | Resistencia (kg/cm ²) | % |
|---|-----------|------------------------|-------------|------------------|----------------------------|-----------------------------------|---------------|
| 1 | 4.015 | 10.125 | 20.15 | 41585.5 | 80.52 | 516.46 | 105.40 |
| 2 | 4.05 | 10.075 | 20.05 | 39892.7 | 79.72 | 500.41 | 102.12 |
| 3 | 3.996 | 10.1 | 20.3 | 40588.9 | 80.12 | 506.6 | 103.39 |
| 4 | 4.05 | 10.075 | 20.1 | 39568.6 | 79.72 | 496.34 | 101.29 |
| 5 | 4.048 | 10.1 | 20.2 | 40947.5 | 80.12 | 511.08 | 104.30 |
| 6 | 3.998 | 10.075 | 20 | 39542.7 | 79.72 | 496.02 | 101.23 |
| 7 | 4.054 | 10.05 | 20.1 | 39621.2 | 79.33 | 499.45 | 101.93 |
| 8 | 3.992 | 10.125 | 20.15 | 41015.4 | 80.52 | 509.38 | 103.96 |
| 9 | 4.018 | 10.175 | 20.05 | 40423.9 | 81.31 | 497.16 | 101.46 |
| 10 | 4.125 | 10.175 | 20.15 | 41002.5 | 81.31 | 504.27 | 102.91 |
| 11 | 4.107 | 10.125 | 20.1 | 40256.8 | 80.52 | 499.96 | 102.03 |
| 12 | 4.110 | 10.1 | 20 | 39568 | 80.12 | 493.86 | 100.79 |
| 13 | 4.155 | 10.05 | 20.05 | 39098.8 | 79.33 | 492.86 | 100.58 |
| 14 | 4.038 | 10.1 | 20.1 | 40215.1 | 80.12 | 501.94 | 102.44 |
| 15 | 4.015 | 10.075 | 20 | 39650.2 | 79.72 | 497.37 | 101.50 |
| 16 | 4.12 | 10.15 | 20.05 | 40515.2 | 80.91 | 500.74 | 102.19 |
| 17 | 4.025 | 10.1 | 20.1 | 41115.5 | 80.12 | 513.17 | 104.73 |
| 18 | 4.030 | 10.1 | 20.15 | 39925.1 | 80.12 | 498.32 | 101.7 |
| 19 | 4.025 | 10.2 | 20.2 | 40425.6 | 81.71 | 494.74 | 100.97 |
| 20 | 4.000 | 10.075 | 20.1 | 39192.7 | 79.72 | 491.63 | 100.33 |
| 21 | 3.998 | 10.05 | 20.15 | 39741.5 | 79.33 | 500.96 | 102.24 |
| 22 | 3.995 | 10.125 | 20 | 41175.1 | 80.52 | 511.36 | 104.36 |
| 23 | 3.997 | 10.075 | 20.05 | 39785.5 | 79.72 | 499.07 | 101.85 |
| 24 | 3.994 | 10.15 | 20.1 | 41000.2 | 80.91 | 506.74 | 103.42 |
| 25 | 4.052 | 10.125 | 20.15 | 40852.8 | 80.52 | 507.36 | 103.54 |
| 26 | 4.005 | 10.075 | 20.2 | 39192.7 | 79.72 | 491.63 | 100.33 |
| 27 | 4.085 | 10.125 | 20.2 | 41401.5 | 80.52 | 514.18 | 104.93 |
| 28 | 3.994 | 10.1 | 20.15 | 40365.2 | 80.12 | 503.81 | 102.82 |
| 29 | 4.000 | 10.1 | 20.15 | 39914.5 | 80.12 | 498.18 | 101.67 |
| 30 | 4.018 | 10.1 | 20.1 | 39954.7 | 80.12 | 498.69 | 101.77 |
| F'cr (Resistencia promedio a compresión axial): | | | | | | 501.79 | 102.41 |
| Ss (desviación estándar): | | | | | | 6.90 % | |
| F'cr (Resistencia característica): | | | | | | 494.89 | |

De acuerdo a los resultados de resistencia a la compresión axial mostrados en la Tabla 58, se observa que la resistencia promedio (f'_{cr}) es de 501.79 kg/cm^2 con una desviación



estándar de 6.90 kg/cm², validando el diseño de mezcla propuesto en la Tabla 30: “Resumen de diseño de mezcla método ACI”

Se elaboró la gráfica lineal de los 30 testigos, para observar con mayor detalle la desviación de la resistencia de los testigos cilíndricos de concreto. Como puede observarse en el Gráfico 17.

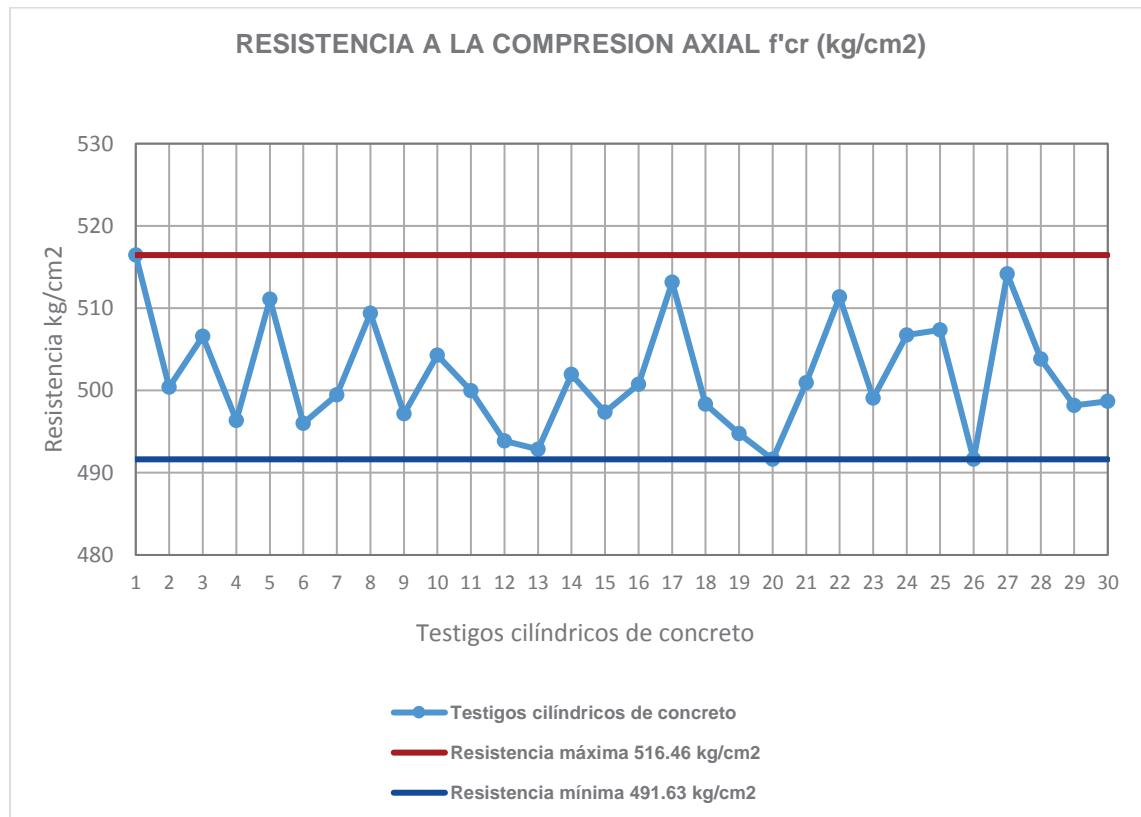


Gráfico 17. Resumen de resultados del ensayo de compresión axial de 30 testigos cilíndricos de concreto a la edad de 28 días

El Gráfico 17 muestra las resistencias alcanzadas de los treinta testigos cilíndricos de concreto a la edad de 28 días, así como el valor máximo (516.48 kg/cm²) y mínimo (491.63 kg/cm²) de las resistencias alcanzadas. Con lo que se reafirma que el diseño de mezcla es correcto y será la base para los posteriores proporcionamientos para fabricar las viguetas pre esforzadas.

Adicionalmente se obtuvieron quince briquetas del mismo diseño para ensayarlas a compresión axial a los tres días de fabricación ya que ese fue el tiempo estimado para destensar el acero y transferir las fuerzas de tensado al concreto. Los resultados se muestran en la Tabla 59.



Tabla 59. Ensayo de testigos cilíndricos de concreto a la edad de 3 días.

| Muestra | Peso (kg) | Diámetro promedio (cm) | Altura (cm) | Resistencia (Kg) | Área en (cm ²) | Resistencia (kg/cm ²) |
|---|-----------|------------------------|-------------|------------------|----------------------------|-----------------------------------|
| 1 | 4.107 | 10.125 | 20.1 | 28430.6 | 80.52 | 353.09 |
| 2 | 4.125 | 10.175 | 20.15 | 29512.1 | 81.31 | 362.96 |
| 3 | 4.018 | 10.175 | 20.05 | 28741.3 | 81.31 | 353.48 |
| 4 | 3.992 | 10.125 | 20.15 | 29749.5 | 80.52 | 369.47 |
| 5 | 4.015 | 10.075 | 20 | 28971.8 | 79.72 | 363.42 |
| 6 | 4.038 | 10.1 | 20.1 | 29102.5 | 80.12 | 363.24 |
| 7 | 4.054 | 10.05 | 20.1 | 28612.6 | 79.33 | 360.68 |
| 8 | 4.05 | 10.075 | 20.05 | 28502.1 | 79.72 | 357.53 |
| 9 | 3.996 | 10.1 | 20.3 | 28778.6 | 80.12 | 359.19 |
| 10 | 4.05 | 10.075 | 20.1 | 28354.3 | 79.72 | 355.67 |
| 11 | 4.155 | 10.05 | 20.05 | 28789.7 | 79.33 | 362.91 |
| 12 | 3.998 | 10.075 | 20 | 28800.5 | 79.72 | 361.27 |
| 13 | 4.015 | 10.125 | 20.15 | 28798.9 | 80.52 | 357.66 |
| 14 | 4.11 | 10.1 | 20 | 29201.4 | 80.12 | 364.47 |
| 15 | 4.048 | 10.1 | 20.2 | 28789.5 | 80.12 | 359.33 |
| F'cr (Resistencia promedio a compresión axial): | | | | | | 360.29 |
| Ss (desviación estándar): | | | | | | 4.40 |
| F'cr (Resistencia característica): | | | | | | 355.89 |

De acuerdo a los resultados de resistencia a la compresión axial mostrados en la Tabla 59, se observa que la resistencia promedio (f'_{cr}) es de 360.29 kg/cm^2 con una desviación estándar de 4.40 kg/cm^2 .

Se elaboró la gráfica lineal de los 15 testigos, para observar con mayor detalle la desviación de la resistencia de los testigos cilíndricos de concreto a tres días de edad. Como puede observarse en el Gráfico 18.

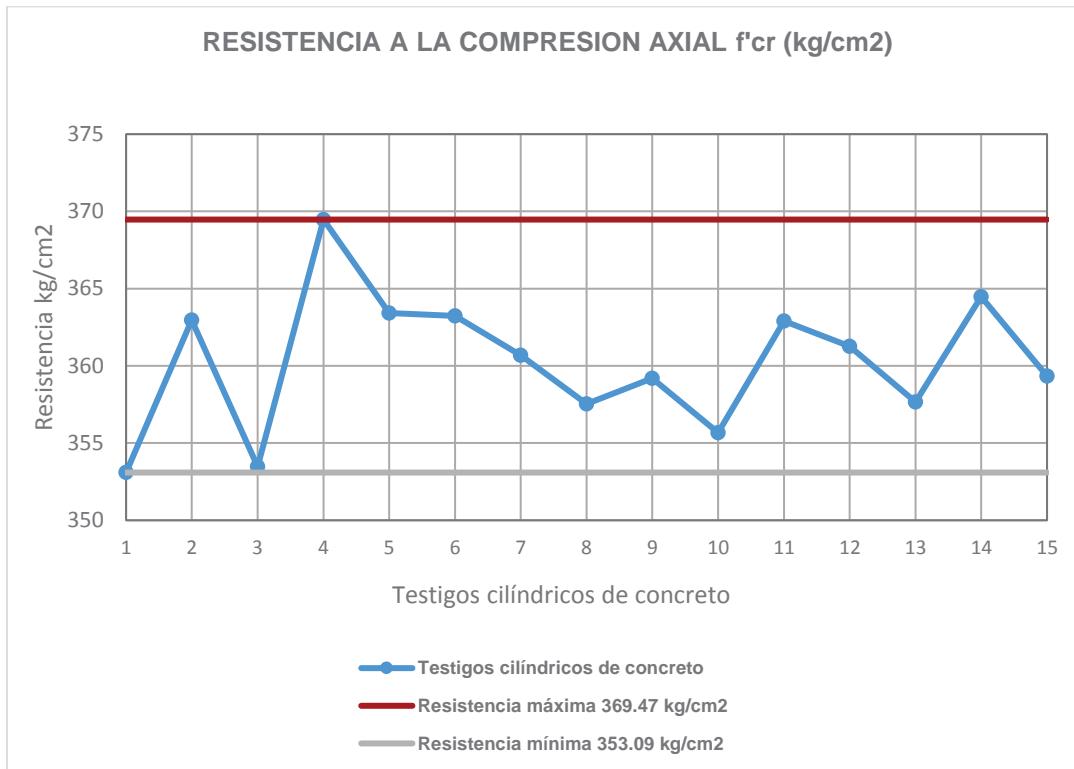


Gráfico 18. Resumen de resultados del ensayo de compresión axial de 15 testigos cilíndricos de concreto a la edad de 3 días.

Según el diseño de viguetas pre esforzadas planteado, la resistencia del concreto a la cual se debe transferir las cargas de pre esforzado del acero al concreto es de 350 kg/cm², el resultado de este ensayo nos permite desencofrar y liberar los alambres de alta resistencia de las viguetas a los tres días de edad. Finalmente, este es el diseño de mezcla de concreto adoptada para la fabricación de las viguetas pre esforzadas ya que cumplen con todas las características que se requiere para su fabricación.

9.3. Resultados del acero de alta resistencia.

9.3.1. Resultados del ensayo a tracción directa.

En todas las muestras ensayadas se logra la fluencia con estricción y ruptura por tracción. La Tabla 60 muestra un resumen de los resultados obtenidos para la serie de muestras de diámetro nominal 4.2 mm. En la tabla se presenta la nomenclatura utilizada, el límite de fluencia, la resistencia a la tracción máxima, con los promedios respectivos y desviaciones estándar asociadas. Para este caso se observa a partir de los resultados numéricos obtenidos una uniformidad en los valores para cada uno de los parámetros estudiados en cada grupo de muestras, con magnitudes similares entre sí.

Los datos obtenidos (Ver anexo 3), dan como curvas de esfuerzo- deformación, como la



que se ve en el Gráfico 19.

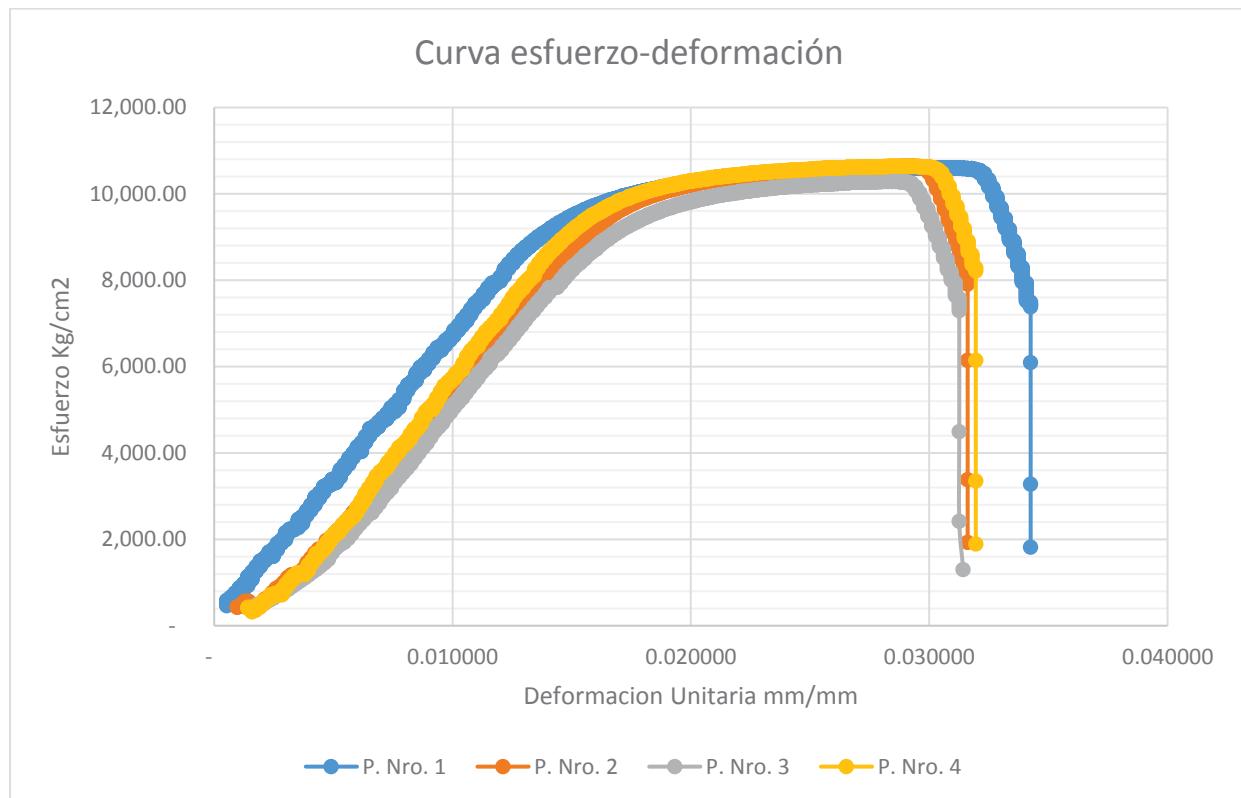


Gráfico 19. Curvas esfuerzo-deformación de las pruebas realizadas

Obtenidas las curvas de cada prueba, se analizó y determinó su límite de fluencia. El límite de fluencia se define como el valor del esfuerzo que al ser aplicado al acero produce una deformación permanente de 0.2%, tal como se puede observar en el Gráfico 20.

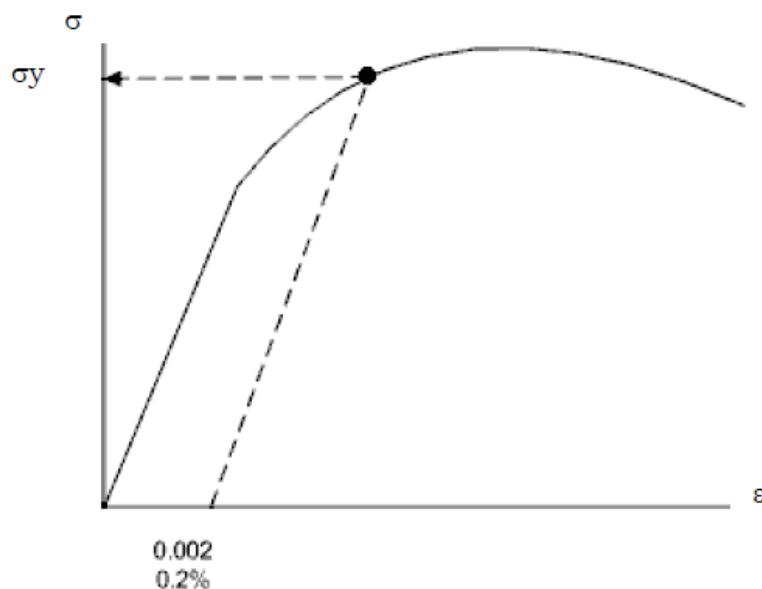


Gráfico 20. Deformación permanente de 0.2%



En cada caso se analizó el límite de fluencia y a la deformación que se produce, como se observan en los Gráficos 21,22, 23 y 24.

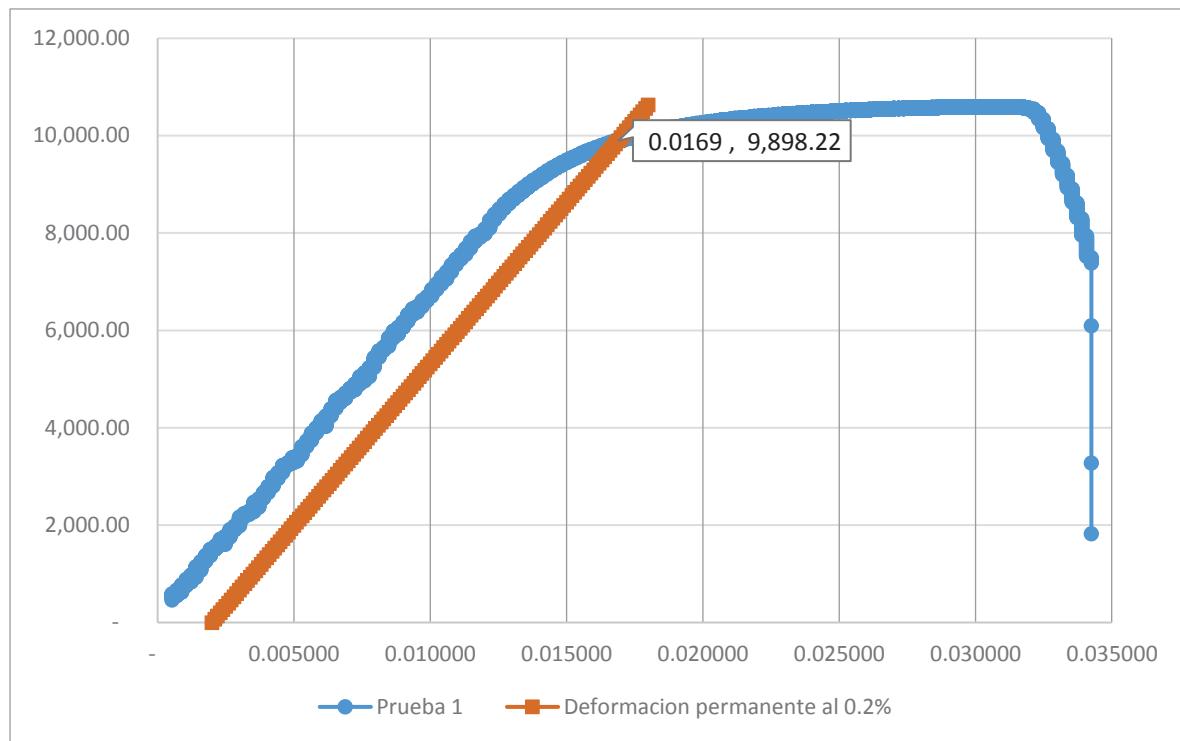


Gráfico 21. Curva esfuerzo deformación de la P. Nro. 1

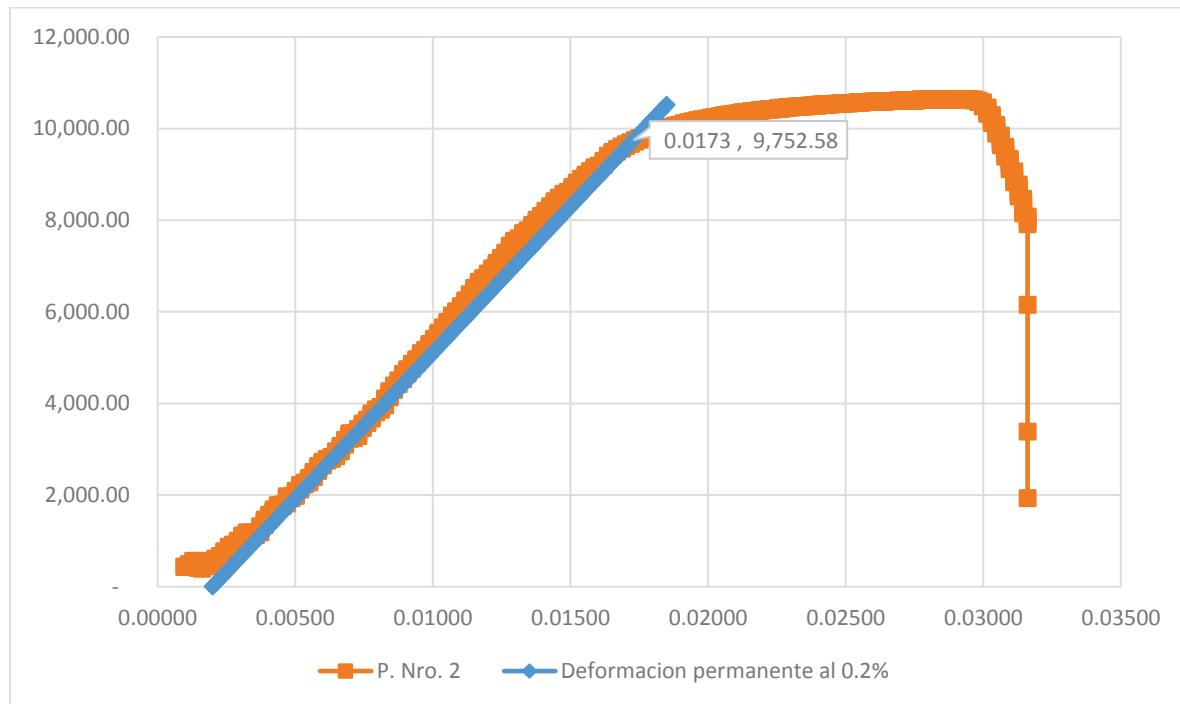


Gráfico 22. Curva esfuerzo- deformación de la P. Nro. 2.

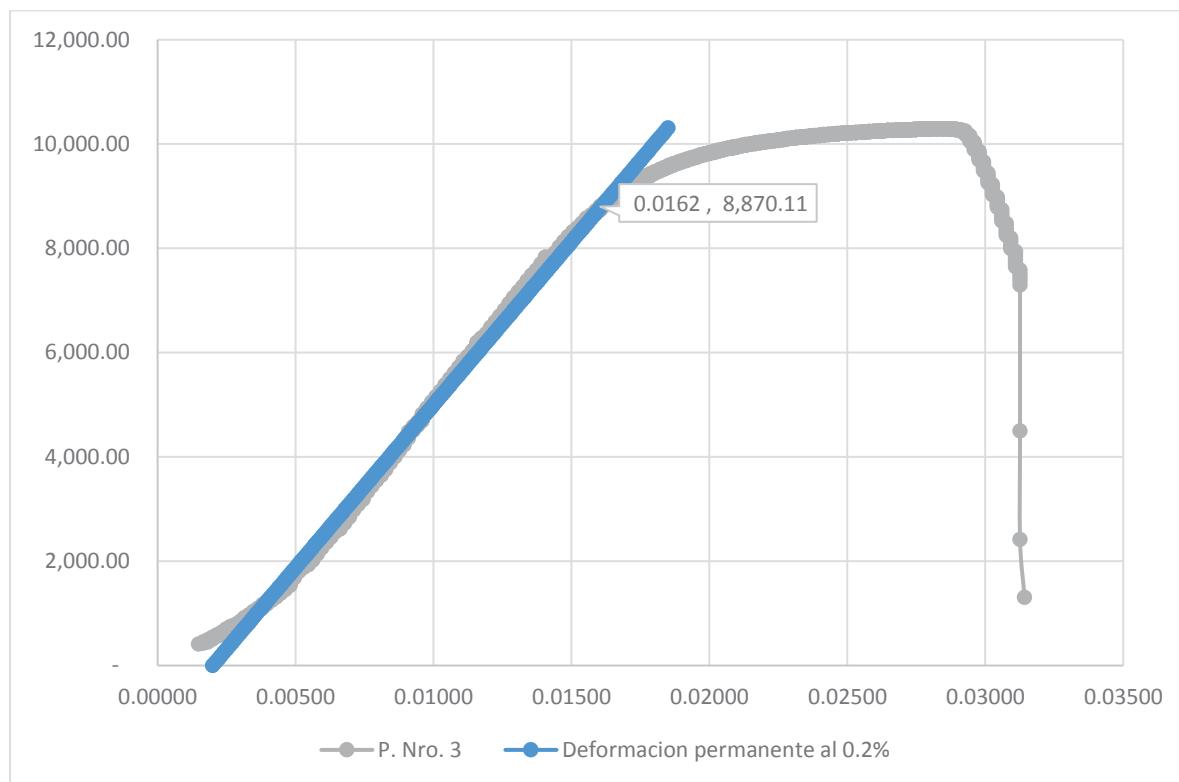


Gráfico 23. Curva esfuerzo-deformación de la P. Nro. 3.

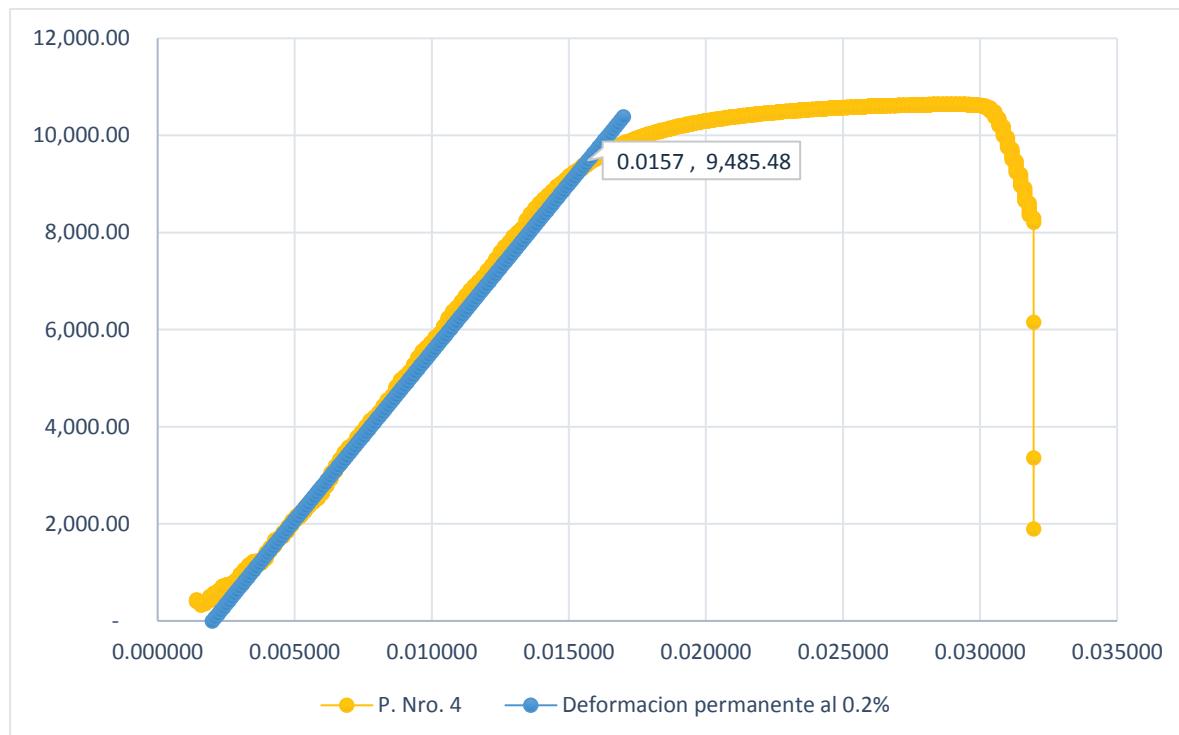


Gráfico 24. Curva esfuerzo-deformación de la P. Nro. 4.

De las curvas esfuerzo- deformación unitaria, se obtiene las propiedades mecánicas que se observa en la Tabla 60, donde se encuentra el promedio de cada propiedad mecánica, y los que son usados en los distintos cálculos que se realizaron en los capítulos anteriores.



Tabla 60. Pruebas de acero

| Muestra | Carga Límite de fluencia (Kgf) | Tensión de Límite de Fluencia (Kg/cm ²) | Deformación unitaria en el punto de fluencia (mm/mm) | Resistencia a la tracción máxima (Kgf) | Tensión de Rotura (Kg/cm ²) | Máxima Deformación unitaria (mm/mm) |
|---------------------|--------------------------------|---|--|--|---|-------------------------------------|
| P. Nro. 01 | 1,243.00 | 9,898.22 | 0.01690 | 1,331.00 | 10,591.76 | 0.03426 |
| P. Nro. 02 | 1,225.00 | 9,752.58 | 0.01730 | 1,337.00 | 10,639.51 | 0.03161 |
| P. Nro. 03 | 1,116.00 | 8,870.11 | 0.01620 | 1,293.00 | 10,289.37 | 0.03143 |
| P. Nro. 04 | 1,186.00 | 9,485.48 | 0.01570 | 1,337.00 | 10,639.51 | 0.03195 |
| Promedio | 1,192.50 | 9,501.60 | 0.01653 | 1,324.50 | 10,540.04 | 0.03231 |
| Desviación Estándar | 56.28 | 454.36 | 0.00071 | 21.19 | 168.62 | 0.00131 |

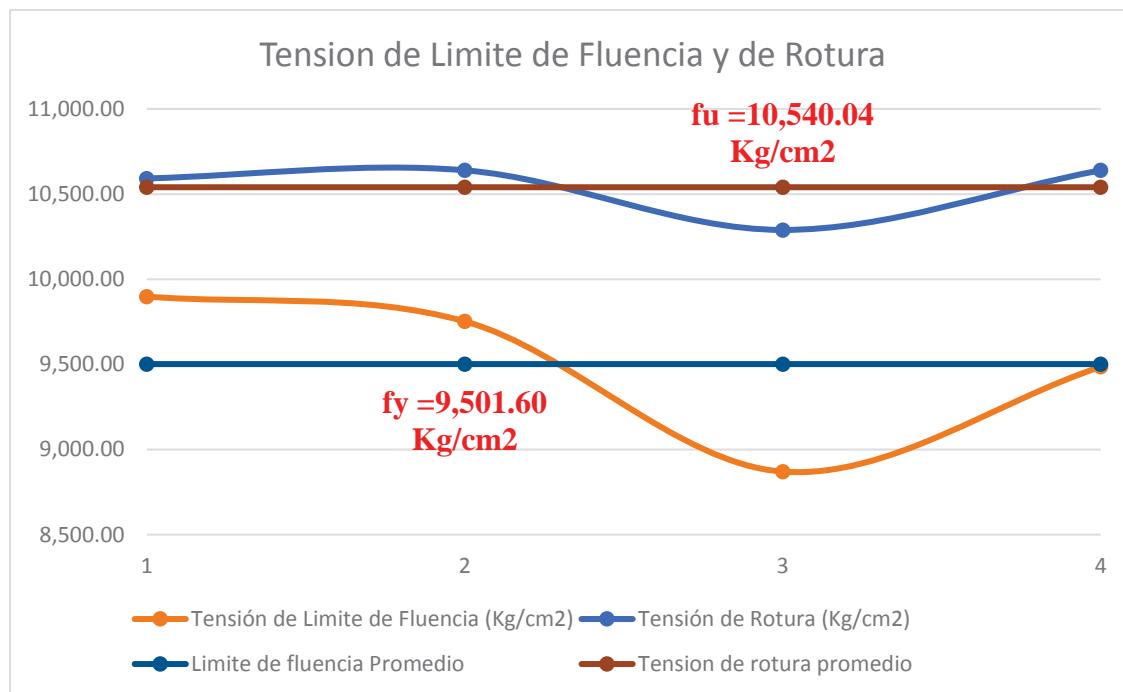


Gráfico 25. Tensión de Límite de fluencia y de Rotura

De la Tabla 60, se obtiene los Gráficos 25 y 26. Se puede observar que los ensayos realizados a los alambre para el pre esforzado, dan un Límite de fluencia promedio de 9,501.60 Kg/cm² y un tension de rotura promedio de 10,540.04 Kg/cm².



DEFORMACION UNITARIA

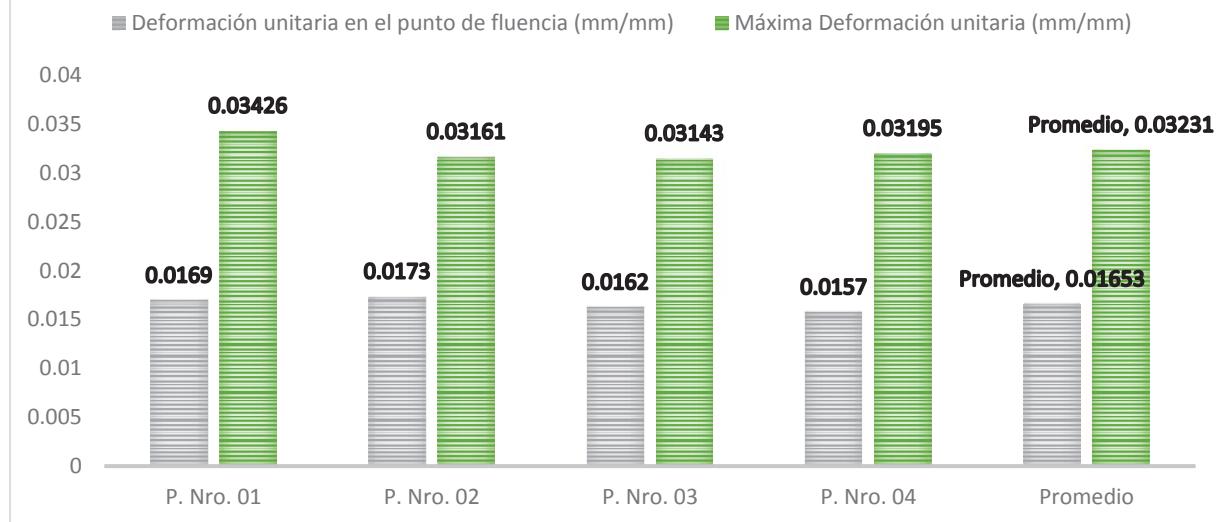


Gráfico 26. Deformación unitaria en el límite de fluencia y en el de Ruptura

Según el Gráfico 26 observamos que se tiene una deformación unitaria promedio en el límite de fluencia de 0.01653 mm/mm y en el punto de ruptura tenemos una deformación unitaria promedio de 0.03231 mm/mm, siendo en este caso la deformación unitaria en el límite de fluencia el 51.16% de la deformación unitaria del alambre en el punto de ruptura. Estos datos fueron utilizados en los capítulos anteriores de diseño y elaboración.

Dependiendo de la calidad del acero de alta resistencia se diseñan viguetas de diferentes longitudes, en el caso de este trabajo de investigación, se utilizó un acero con baja concentración de carbono el cual posee una deformación unitaria pequeña y un límite de fluencia bajo para considerarse acero de alta resistencia, se puede mejorar la calidad de acero para futuros ensayos o para la apertura de una planta de fabricación de viguetas pre esforzadas.

9.4. Resultados de ensayos en viguetas pre esforzadas.

9.4.1. Resistencia a la compresión axial de testigos de concreto tomados durante la fabricación de viguetas pre esforzadas

A continuación, se detalla la resistencia del concreto utilizado para la fabricación de las viguetas pre esforzadas durante el vaciado de las mismas, se tomaron nueve briquetas de concreto para controlar su resistencia y el cronograma de rupturas fue como se indica en la Tabla 61.



Tabla 61. Cronograma de roturas de testigos cilíndricos.

| Edad del concreto | Nº de briquetas |
|-------------------|-----------------|
| 3 días | 3 |
| 7 días | 3 |
| 28 días | 3 |

- Resistencia a la compresión de las briquetas de concreto utilizado en la fabricación de viguetas pre esforzadas a tres días de edad.

Tabla 62. Rotura de briquetas a los 3 días.

| CARGA (kg) | DIAMETRO (cm) | AREA (cm ²) | RESISTENCIA (Kg/cm ²) | RESISTENCIA PROMEDIO (Kg/cm ²) | DESVIACION ESTANDAR | DESVIACION ESTANDAR % |
|------------|---------------|-------------------------|-----------------------------------|--|---------------------|-----------------------|
| 30437.90 | 10.22 | 82.03 | 371.04 | 358.41 | 11.01 | 3.07 |
| 28025.40 | 10.05 | 79.33 | 353.29 | 358.41 | 11.01 | 3.07 |
| 27283.80 | 9.95 | 77.76 | 350.89 | 358.41 | 11.01 | 3.07 |

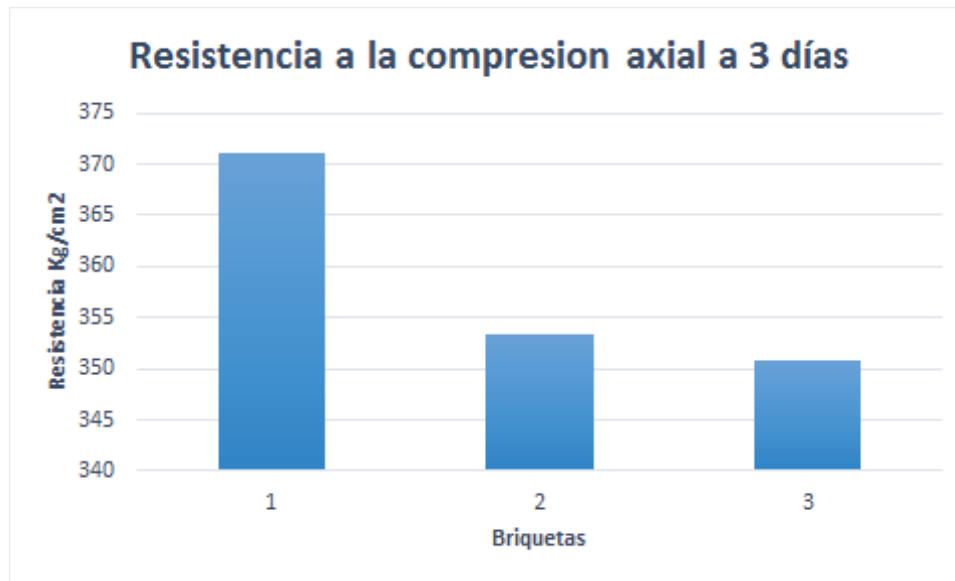


Gráfico 27. Resistencia a la compresión axial a 3 días.

El concreto utilizado en la fabricación de viguetas pre esforzadas alcanzo una resistencia a la compresión axial promedio de 358.41 Kg/cm² a 3 días de edad, es en esta etapa en la



que se cortan los dos extremos el acero que se encuentran sujetados a los anclajes para garantizar una correcta transmisión de pre esfuerzos del alambre de alta resistencia hacia el concreto.

- Resistencia a la compresión de las briquetas de concreto utilizado en la fabricación de viguetas pre esforzadas a siete días de edad.

Tabla 63. Rotura de briquetas a los 14 días.

| CARGA (kg) | DIAMETRO (cm) | AREA (cm ²) | RESISTENCIA (Kg/cm ²) | RESISTENCIA PROMEDIO (Kg/cm ²) | DESVIACION ESTANDAR | DESVIACION ESTANDAR % |
|-----------------|------------------|----------------------------|--------------------------------------|--|------------------------|-----------------------------|
| 31428.60 | 10.00 | 78.54 | 400.16 | 417.19 | 17.70 | 4.24 |
| 35655.20 | 10.21 | 81.87 | 435.49 | 417.19 | 12.88 | 4.24 |
| 32666.70 | 10.00 | 78.54 | 415.92 | 417.19 | 12.88 | 4.24 |

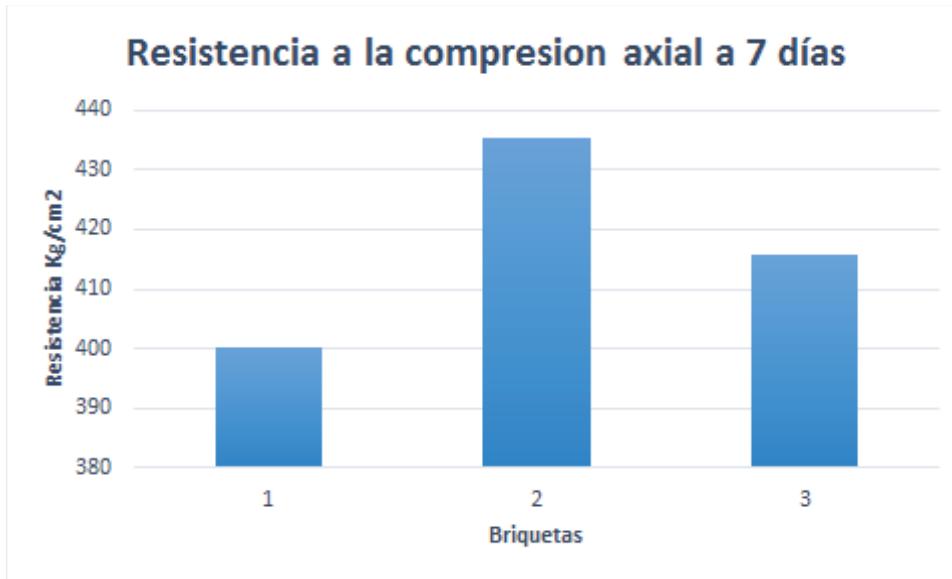


Gráfico 28. Resistencia a la compresión axial a 7 días.

El concreto utilizado en la fabricación de viguetas pre esforzadas alcanzo una resistencia a la compresión axial promedio de 417.19 Kg/cm² a 7 días de edad, lo cual garantiza la seguridad en el transporte y la puesta en obra de este producto.

- Resistencia a la compresión de las briquetas de concreto utilizado en la fabricación de viguetas pre esforzadas a veintiocho días de edad.



Tabla 64. Rotura de briquetas a los 28 días.

| Carga (kg) | Diámetro (cm) | Área (cm ²) | Resistencia (kg/cm ²) | Resistencia promedio (kg/cm ²) | Desviación estándar | Desviación estándar % |
|-----------------|------------------|----------------------------|--------------------------------------|--|------------------------|-----------------------------|
| 43585.50 | 10.16 | 81.07 | 537.61 | 511.57 | 22.64 | 4.43 |
| 38992.70 | 10.00 | 78.54 | 496.47 | 511.57 | 22.64 | 4.43 |
| 40588.90 | 10.16 | 81.07 | 500.64 | 511.57 | 22.64 | 4.43 |

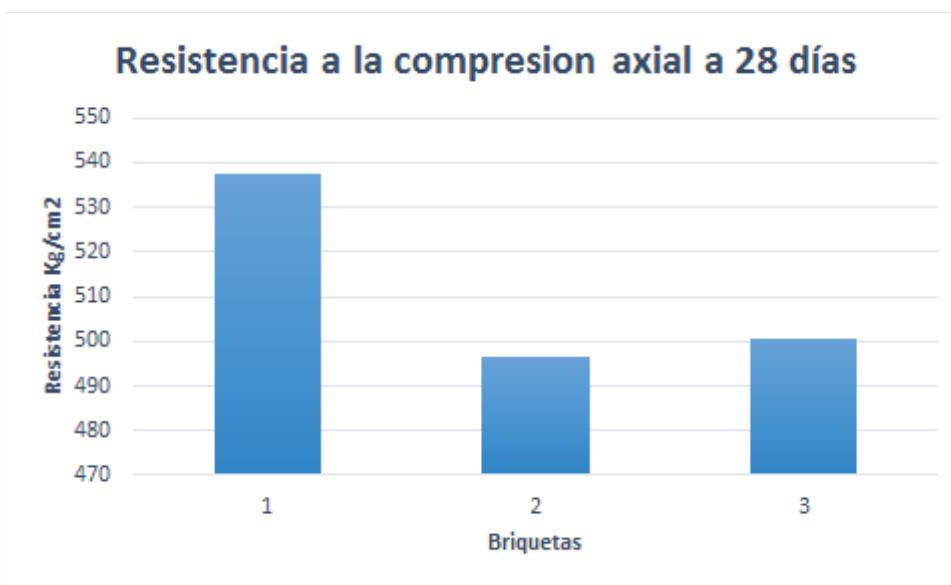


Gráfico 29. Resistencia a la compresión axial a 28 días.

El concreto utilizado en la fabricación de viguetas pre esforzadas alcanzo una resistencia a la compresión axial promedio de 511.57 Kg/cm² a 28 días de edad.



9.4.2. Resultados en flexión de viguetas pre esforzadas en laboratorio.

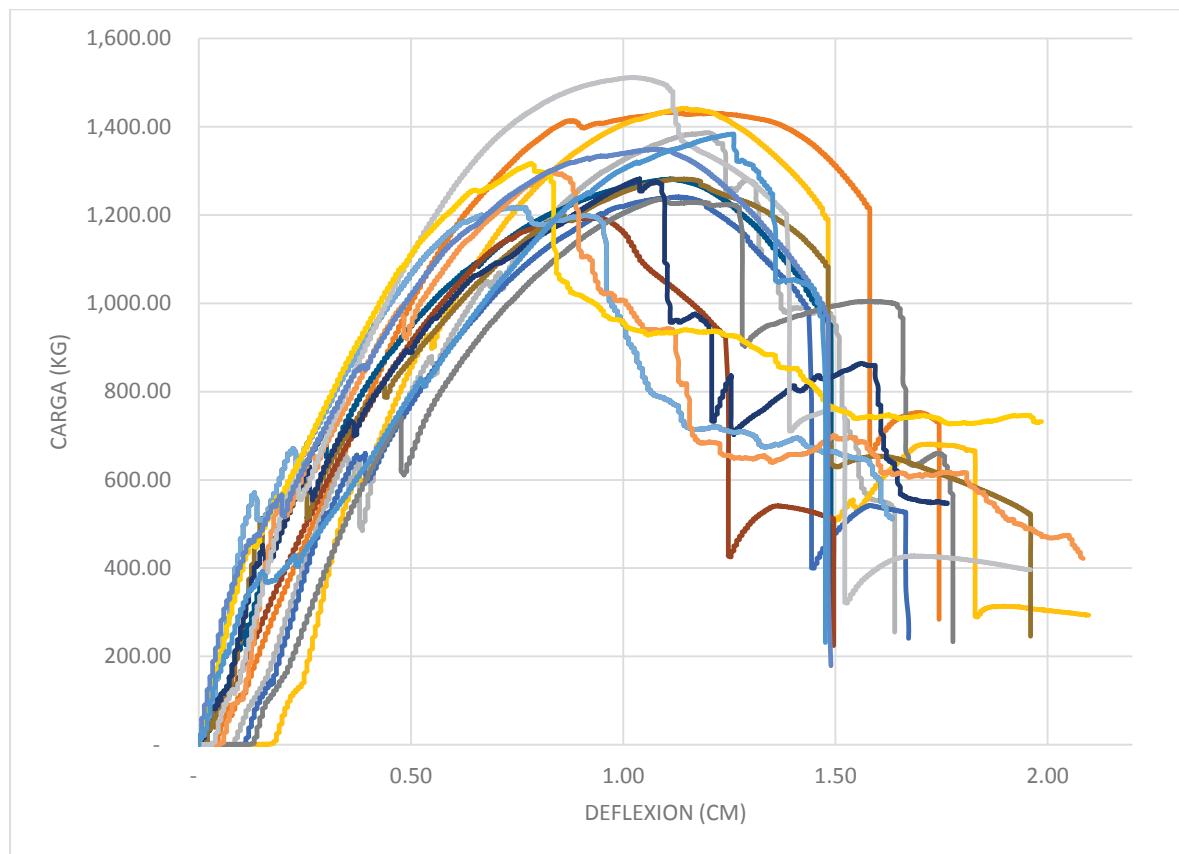


Gráfico 30. Curvas de cada ensayo, Carga (kg) – Deflexión (cm).

Analizando las curvas del ensayo de flexión, se obtiene el cuadro resumen, que muestra las cargas máximas que soportaron las viguetas pre esforzadas, con sus respectivas deflexiones.



Tabla 65. Prueba a flexión de viguetas pre esforzadas con la maquina universal.

| Muestra | Carga Máxima (Kg) | Deflexión Máxima (cm) |
|-----------------------|----------------------|--------------------------|
| M2-9 | 1,432.60 | 1.74 |
| M2-8 | 1,386.81 | 1.64 |
| M2-7 | 1,441.98 | 2.10 |
| M2-6 | 1,240.79 | 1.67 |
| M2-5 | 1,281.68 | 1.49 |
| M2-4 | 1,193.48 | 1.50 |
| M2-3 | 1,235.59 | 1.78 |
| M2-2 | 1,281.68 | 1.96 |
| M2-1 | 1,282.09 | 1.76 |
| M1-9 | 1,217.44 | 1.63 |
| M1-8 | 1,301.26 | 2.08 |
| M1-7 | 1,180.63 | 1.39 |
| M1-6 | 1,407.41 | 1.44 |
| M1-5 | 1,320.25 | 1.71 |
| M1-4 | 1,511.53 | 1.96 |
| M1-3 | 1,316.86 | 1.99 |
| M1-2 | 1,348.78 | 1.49 |
| M1-1 | 1,383.65 | 1.48 |
| Promedio | 1,320.25 | 1.71 |
| Desv. Estándar | 92.45 | 0.23 |

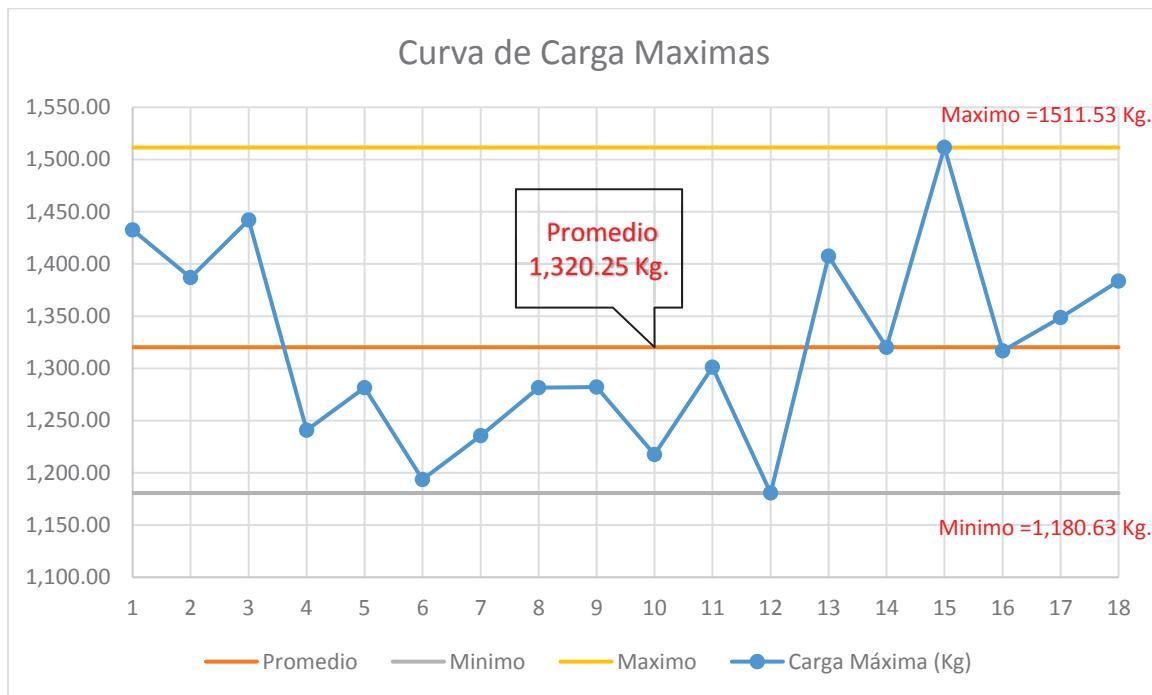


Gráfico 31. Curva de Cargas máximas según ensayo a flexión.

De la Tabla 65, se obtiene el Gráfico 31, donde se observan las cargas máximas de cada vigüeta ensayada. Obteniendo un máximo de 1,511.53 Kg, un mínimo de 1,180.63 Kg y un promedio de 1,320.25 Kg.

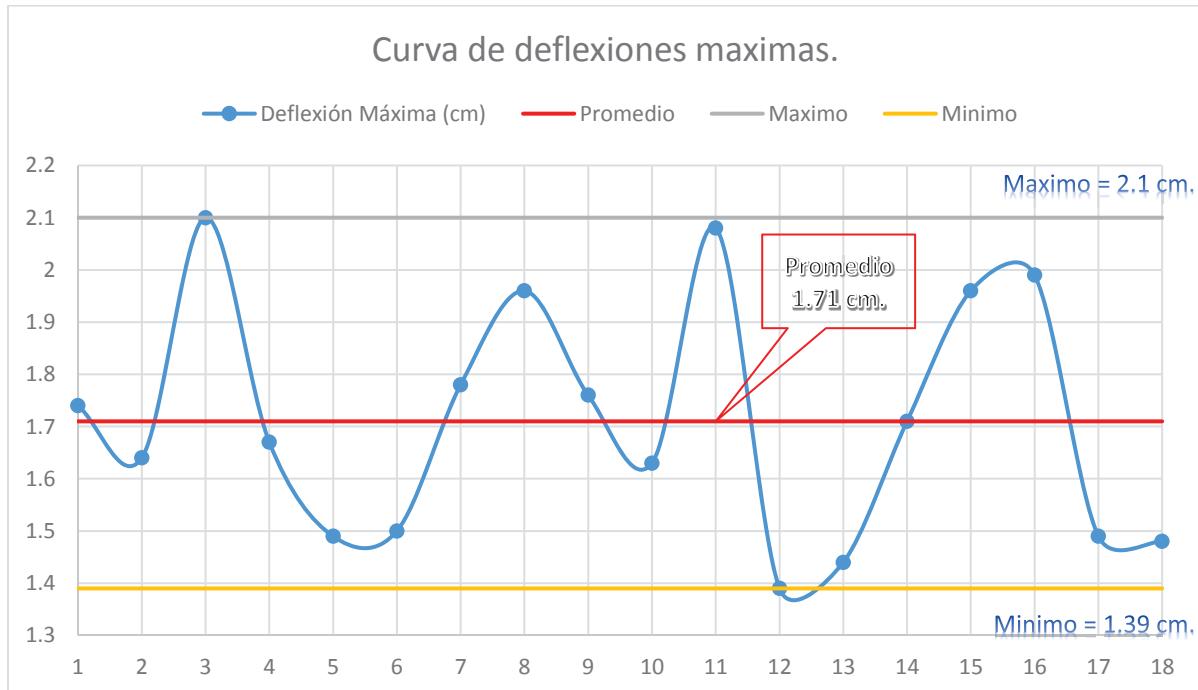


Gráfico 32. Curva de deflexiones máximas según ensayo a flexión.



De la Tabla 65, se obtiene el Gráfico 32, donde se observan las deflexiones máximas de cada vigueta pre esforzada ensayada. Obteniendo un máximo de 2.10 cm, un mínimo de 1.39 cm y un promedio de 1.71 cm.

9.4.3. Resultados en flexión de viguetas pre esforzadas en campo.

En el siguiente cuadro se detalla el proceso de carga y la deflexión medida en las viguetas pre esforzadas.

Tabla 66. Carga de viguetas pre esforzadas.

| PROCESO DE CARGA | | | | |
|---------------------|---------------|---------------------|---------------------|----------------------------|
| Nº <i>BOLSAS</i> | CARGA (kg) | DEFLEXIÓN 1 (cm) | DEFLEXIÓN 2 (cm) | DEFLEXIÓN PROMEDIO (cm) |
| 0 | 36.00 | 0.00 | 0.00 | 0.00 |
| 14 | 631.00 | 2.50 | 2.00 | 2.25 |
| 16 | 716.00 | 3.40 | 2.60 | 3.00 |
| 17 | 758.50 | 4.00 | 3.00 | 3.50 |
| 19 | 843.50 | 5.40 | 4.30 | 4.85 |
| 23 | 1013.50 | 9.90 | 10.80 | 10.35 |
| 24 | 1056.00 | RUPTURA | RUPTURA | RUPTURA |

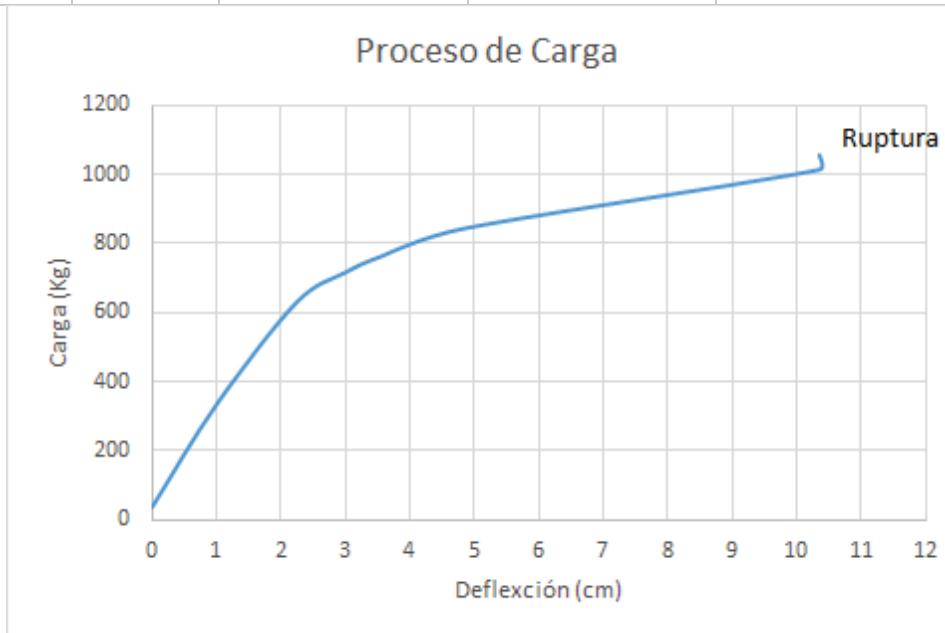


Gráfico 33. Proceso de carga (Curva Carga - Deflexión)

En el gráfico se aprecia el comportamiento de la vigueta sometida a flexión, nos muestra un rango elástico (comprendido desde los 0Kg hasta los 630Kg) y un rango plástico (comprendido desde los 630Kg hasta los 1013.5Kg). y se aprecia claramente el punto de



ruptura con una carga de 1056Kg. Analizando los resultados se determina que las nuestras pre esforzadas cumplen con las solicitudes y poseen un comportamiento elástico.

A continuación, se detalla el proceso de descarga y las deflexiones correspondientes de las viguetas pre esforzadas.

Tabla 67. Descarga en las viguetas pre esforzadas.

| PROCESO DE DESCARGA | | | | |
|----------------------|-----------------------|-----------------------------|-----------------------------|------------------------------------|
| <i>Nº BOLSAS</i> | <i>CARGA (kg)</i> | <i>DEFLEXIÓN 1 (cm)</i> | <i>DEFLEXIÓN 2 (cm)</i> | <i>DEFLEXIÓN PROMEDIO (cm)</i> |
| 14 | 631.00 | 4.80 | 4.10 | 4.45 |
| 11 | 503.50 | 4.10 | 3.60 | 3.85 |
| 7 | 333.50 | 3.50 | 3.40 | 3.45 |
| 6 | 291.00 | 3.00 | 3.20 | 3.10 |
| 4 | 206.00 | 2.30 | 3.10 | 2.70 |
| 0 | 36.00 | 1.50 | 3.00 | 2.25 |

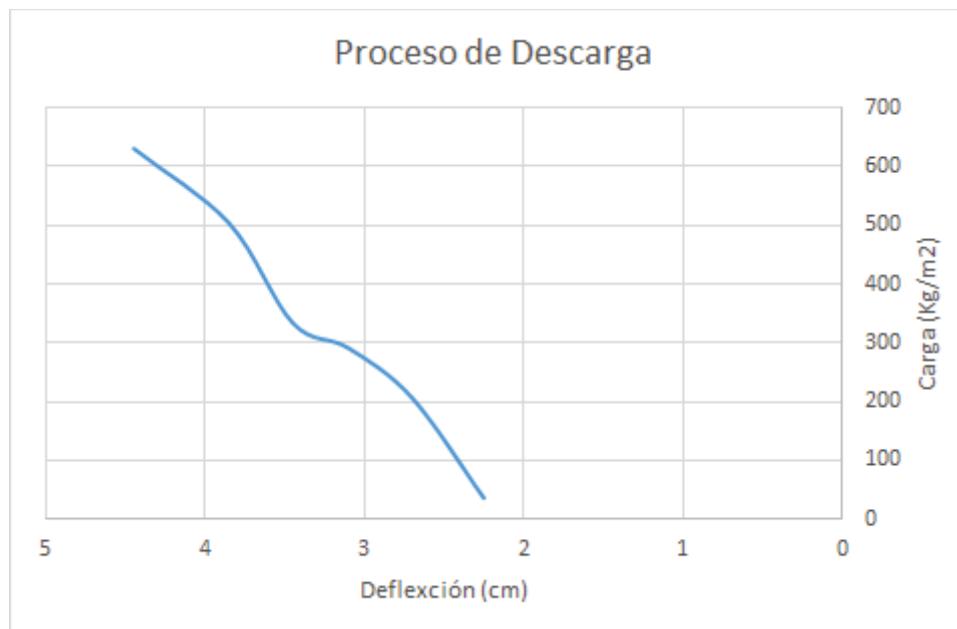


Gráfico 34. Proceso de descarga (Curva Carga – Deflexión)

En el Gráfico 34 del proceso de descarga se observa el comportamiento elástico del elemento, el cual no tiene una recuperación completa, pero sigue una línea de tendencia tal como se muestra a continuación:

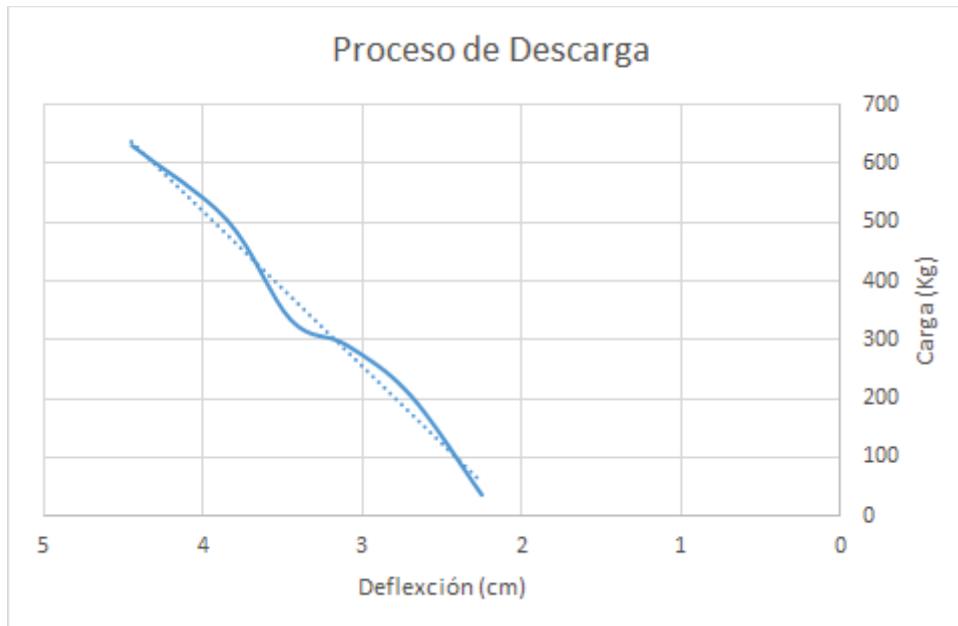


Gráfico 35. Proceso de descarga (Línea de tendencia)

9.5. Resultados del estudio de mercado

Se realizó esta encuesta a un total de 50 ingenieros civiles y los resultados se muestran en la Tabla 68.

Tabla 68. Resultado de encuestas

| Pregunta | Si | No | Total |
|---|----|----|-----------|
| ¿Utilizo alguna vez viguetas pre esforzadas en la construcción? | 12 | 38 | 50 |
| ¿Conoce usted empresas fabricantes de viguetas pre esforzadas en la ciudad del Cusco? | 21 | 29 | 50 |
| ¿Conoce usted alguna obra en la que utilizaron viguetas pre esforzadas? | 13 | 37 | 50 |
| Si se fabricaran viguetas pre esforzadas en la zona de Cusco ¿Usted las utilizaría? | 43 | 7 | 50 |

Ver anexo 1



Tabla 69. Resultado de encuestas en porcentaje

| Pregunta | Si (%) | No (%) | Total (%) |
|--|--------|--------|-------------|
| ¿Utilizo alguna vez viguetas pre esforzadas en la construcción? | 24% | 76% | 100% |
| ¿Conoce usted empresas fabricantes de viguetas pre esforzadas en la ciudad del Cusco? | 42% | 58% | 100% |
| ¿Conoce usted alguna obra en la que utilizaron viguetas pre esforzadas? | 26% | 74% | 100% |
| Si se fabricaran viguetas pre esforzadas en la zona de Cusco ¿Usted las utilizaría? | 86% | 14% | 100% |

Ver anexo 1

➤ Pregunta N° 1 de la encuesta

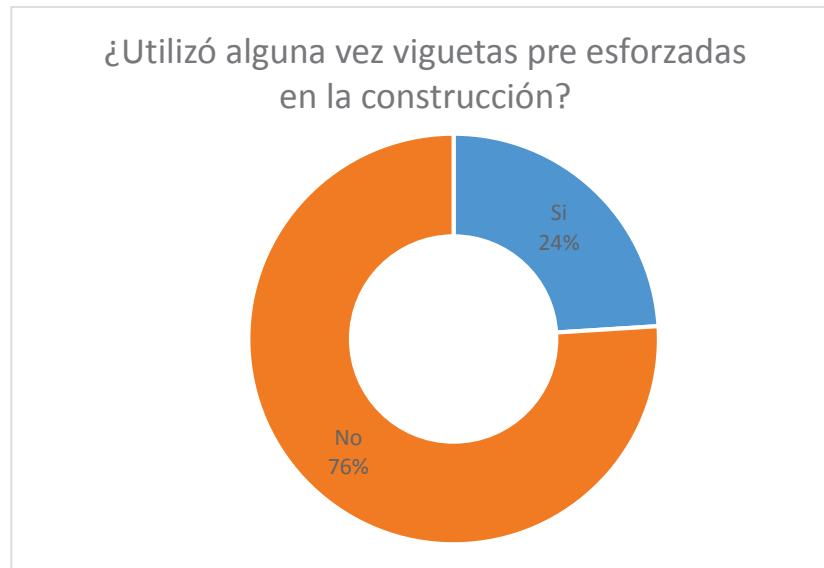


Gráfico 36. ¿Utilizo alguna vez viguetas pre esforzadas en la construcción?

El **24%** de los encuestados utilizó alguna vez las viguetas pre esforzadas en la construcción y el **76%** nunca la utilizó.

➤ Pregunta N° 2 de la encuesta



¿Conoce usted empresas fabricantes de viguetas pre esforzadas en la ciudad de Cusco?

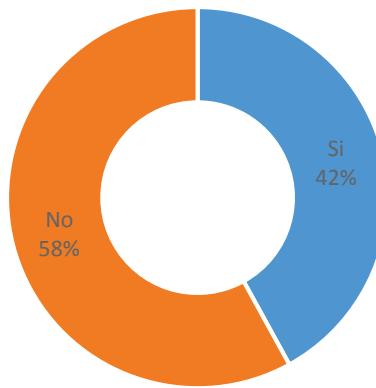


Gráfico 37. ¿Conoce usted empresas fabricantes de viguetas pre esforzadas en la ciudad del Cusco?

El **42%** de los encuestados conoce empresas fabricantes de viguetas pre esforzadas, pero se debe asumir que respondieron a la pregunta erróneamente ya que no existen empresas fabricantes en la ciudad de Cusco, sino que existen empresas vendedoras de este producto, la mayoría nombró a Pretensa, pero esta empresa ya no está en el mercado cusqueño, y el **58%** desconoce acerca de este tema.

➤ Pregunta N° 3 de la encuesta.

¿Tiene usted referencia de alguna obra en la que utilizaron viguetas pre esforzadas?

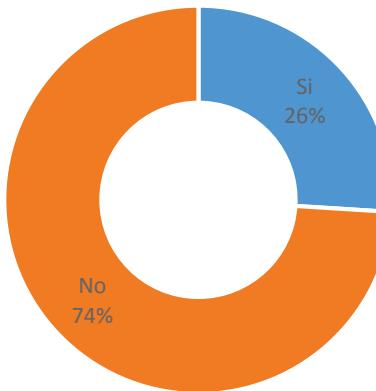


Gráfico 38. ¿Tiene usted referencia de alguna obra en la que utilizaron viguetas pre esforzadas?



El **26%** de los encuestados tiene una referencia o conoce de alguna construcción en la que se utilizaron las viguetas pre esforzadas y el **74%** no tiene referencia alguna.

➤ Pregunta N° 4 de la encuesta

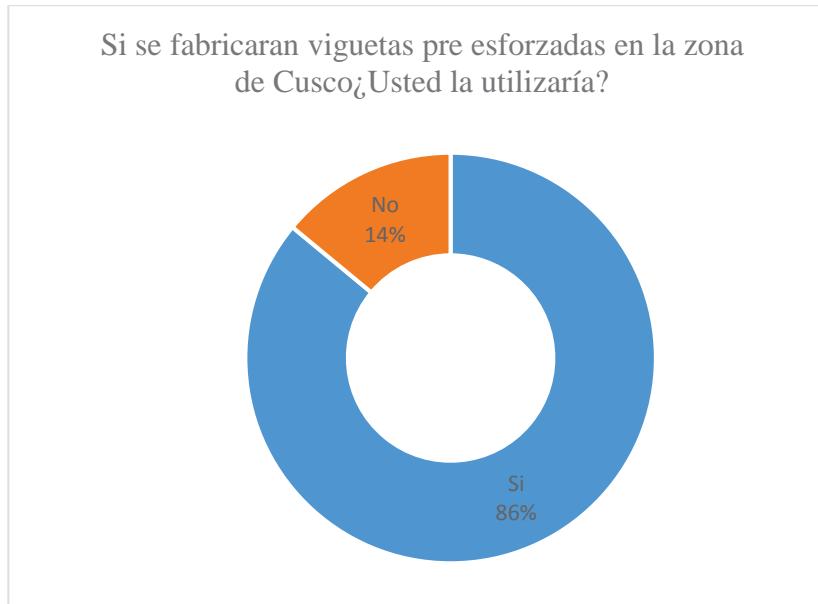


Gráfico 39. Si se fabricaran viguetas pre esforzadas en la zona de Cusco ¿Usted la utilizaría?

El **86%** de los encuestados utilizaría las viguetas pre esforzadas fabricadas en Cusco en la construcción y el **14%** no la utilizaría.

➤ Finalmente, los encuestados coincidieron en que la principal razón para que las viguetas pre esforzadas no sean utilizadas en las construcciones es el desconocimiento de esta tecnología de construcción y la escasez de vendedores de este producto.

En este estudio de mercado se observa que hay muchas personas interesadas en la compra y uso de las viguetas pre esforzadas, dando un mercado amplio por explotar en la ciudad de Cusco.



CAPÍTULO X

10. CONCLUSIONES Y RECOMENDACIONES

10.1. Conclusiones

1. Es posible fabricar viguetas pre esforzadas artesanales con agregados de la zona de Cusco y con la tecnología con la que se cuenta en nuestro medio.
2. El mercado de viguetas pre esforzadas en la ciudad de Cusco es incipiente, con la posibilidad de expandirse mucho más, existen muchos clientes potenciales que desconocen de esta metodología de construcción, esto en atención a las encuestas y estudio de mercado realizado en el presente estudio.
3. Las viguetas pre esforzadas artesanales elaboradas con materiales de la zona de Cusco en el presente trabajo de investigación cumplen con los parámetros de la ACI 318-14.
4. Para montar una planta de fabricación de viguetas pre esforzadas artesanales se requiere una inversión inicial que se vuelve rentable debido a que se puede aperturar un nuevo mercado para este producto en la ciudad del Cusco.
5. Durante el análisis físico – mecánico de los agregados utilizados para la fabricación de viguetas pre esforzadas en el presente trabajo, se observó que sus propiedades son muy parecidas a la mayoría de agregados utilizados en la ciudad de Cusco, es por eso que este trabajó podrá ser utilizado como referencia para futuros diseños de concreto de alta resistencia.
6. El principal inconveniente para fabricar las viguetas pre esforzadas es la adquisición del acero de alta resistencia, ya que en la ciudad de Cusco este material no es comercializado, lo venden empresas de Lima, pero en cantidades industriales, para hacer un estudio de factibilidad se consiguió este acero en la ciudad de La Paz – Bolivia ya que ellos son productores masivos de viguetas pre esforzadas.
7. Para elaborar viguetas pre esforzadas en el presente trabajo se hicieron ensayos previos para que finalmente se logren los resultados deseados, así es que se superaron errores y mejoraron las técnicas para optimizar el tiempo de fabricación.
8. El acero utilizado en la elaboración de viguetas pre esforzadas, tiene una tensión de límite de fluencia de $9,501.60 \text{ Kg/cm}^2$ y una tensión a la rotura de $10,540.04$



Kg/cm² que cumple con los requerimientos para elaborar elementos pre esforzados, según la norma ASTM- A-421.

9. Cabe resaltar que el costo unitario por metro lineal de las viguetas pre esforzadas elaboradas artesanalmente es mayor al precio del mercado, en el futuro al implementar una planta de fabricación mecanizada, se ampliaría la producción diaria, por ende, el costo disminuiría en gran proporción.
10. Las viguetas pre esforzadas poseen una capacidad de deflexión y recuperación altas, sin presentar grietas considerables, tal como se apreciaron en los ensayos con la maquina universal del laboratorio de suelos de nuestra escuela profesional.



10.2. Recomendaciones

1. Implementar una planta a nivel industrial para la elaboración masiva de viguetas pre esforzadas en la ciudad de Cusco ya que existe un amplio mercado por explotar.
2. Innovar con tecnologías nuevas de construcción y no quedarnos en lo tradicional de seguir construyendo con las mismas técnicas de hace muchos años.
3. Realizar estudios donde se analice mejor el comportamiento de las viguetas pre esforzadas bajo efectos de sismo.
4. Capacitar a los trabajadores dedicados a la construcción en la instalación de elementos pre fabricados ya que son una solución muy rentable y se acomoda a las necesidades de nuestras poblaciones rurales.
5. Realizar estudios para fabricar viguetas pre esforzadas de diferentes longitudes y que tengan diferentes solicitudes.
6. Para disminuir las perdidas, se puede mejorar el curado del concreto, haciendo un curado a vapor para disminuir las perdidas.
7. Se recomienda realizar una mayor producción, así disminuirá el costo por metro lineal, el producto será más rentable y podrá competir con el existente en el mercado.
8. Durante el proceso constructivo, se recomienda contar con personal experimentado en elaboración de viguetas pre esforzadas, ya que es un proceso constructivo nuevo en nuestra ciudad.
9. Para la fabricación de viguetas pre esforzadas se recomienda, usar alambre de baja relajación de alta resistencia de 18,000 kg/cm², que ayuda a disminuir las perdidas dependientes del tiempo, teniendo un mayor esfuerzo a la ruptura, y mejorando el elemento pre esforzado.



BIBLIOGRAFÍA

- ACI. (Enero de 2005). Institute, American Concrete. *ACI-318S-05*. U.S.A.
- ACI, 3. (s.f.). Requisitos de Reglamento para Concreto Estructural (ACI 318S-05). E.E.U.U.
- Ana, T. C. (2007). *Curso basico de tecnologia del concreto para ingenieros civiles*. Lima.
- ANIVIP. (2008). *Asociacion Nacional de Industriales de Viguetas Pretensadas*, ANIVIP A.C. Obtenido de Manual de diseño estructural de sistemas de piso a base de viguetas pretensadas y bovedillas: www.anivip.org.mx
- ARCELORMITTAL. (s.f.). Arcelormittal. Obtenido de <http://spain.arcelormittal.com/who-we-are.aspx>
- ASTM, 4. (s.f.). Standard Test Method for Particle-Size Analysis of Soils (Withdrawn 2016) ASTM-422.
- BCRP. (s.f.). *Banco Central de Reserva del Perú*. Obtenido de www.bcrp.gob.pe
- Bonilla M., I., Carrillo P., I., Casabonne R., I., Lainez-Lozada, I., & Zegarra C., I. (2002). *Analisis, diseño y construccion en Concreto pretensado y postensado (Norma ACI 318-2002)*. Lima - Peru: CAPITULO PERUANO ACI.
- Bowles, J. E. (s.f.). *Manual de laboratorio de suelos en ingenieria civil*.
- Braig, P. V. (s.f.). *Pretensados Vitus Braig*. Obtenido de <http://www.pretensadosvitusbraig.com/>
- Burns, T. Y. (1981). *Design of Prestressed Concrete Structures*. New York: John Wiley & Sons, Inc.
- De-Acero. (2010). Manual Tecnico Vigueta pre tensada. *Manual Tecnico Vigueta pre tensada*, 1-32.
- Emcocables. (s.f.). Emcocables. *Alambres y torones para Concreto Preesforzado*. Obtenido de www.emcocables.com
- Enrique, P. C. (s.f.). Topicos de Tecnología del concreto.
- Firth. (s.f.). <http://www.firth.com.pe/>.
- Luna Zamudio, M. (2000). *Seminario de tesis - Diseño de estructuras de concreto presforzado*. Mexico.
- Nilson, A. H. (1982). *Diseño de estructuras de Concreto Presforzado*. Mexico: Editorial Limusa, S.A. de C.V.
- Nilson, A. H. (2001). Diseño de estructuras de Concreto. En A. H. Nilson, *Design of Concrete Structures* (págs. 584 - 646). Colombia: Quebecor World Bogota S.A.



NTP400.037. (s.f.). NTP 400.037. *Norma Técnica Peruana*, 8.

Pacasmayo. (s.f.). *Cementos Pacasmayo*. Obtenido de
<http://www.cementospacasmayo.com.pe/productos-y-servicios/productos/sistema-vigueta-bovedilla-soltek/>

PAUL. (s.f.). *Hercab*. Obtenido de <http://hercab.com/equipos-de-pretensado-y-postensado/>

Pretensa. (s.f.). *PRETENSA*. Obtenido de <https://www.pretensa.com>

PRODAC. (s.f.). *Bekaert Prodac*. Obtenido de <https://prodac.bekaert.com/es-MX/la-empresa>

Prodac. (s.f.). *Ficha tecnica "Cable para postensado plastificado y pretensado desnudo"*. Obtenido de www.prodac.com.pe

Riva López, E. (s.f.). *Diseño de mezclas*.

Riva Lopez, E. (s.f.). Materliales para el Concreto.

Rozas Gomez, M. E., & Palma Vargas, R. (2012). *Diseño de mezclas con los diferentes agregados utilizados en la Ciudad del Cusco*. Cusco: Escuela profesional de Ingenieria Civil UNSAAC.

TENSYLAND. (s.f.). *Pretensoland*. Obtenido de <https://www.prensoland.com/>

Topcu, A. (1997). *First Light in the Universe*. Albano: Springer.

ULMEN. (s.f.). *Ulmen Colombia*. Obtenido de www.ulmen.cl

Vipret. (s.f.). *VIPRET*. Obtenido de <http://www.vipret.org/>

YURA. (s.f.). *Yura*. Obtenido de <http://www.yura.com.pe/empresa.html>

YURA, S. (s.f.). Manual de usos y aplicaciones de Cemento Portland Tipo I.



ANEXOS