

PONTIFICIA UNIVERSIDAD CATÓLICA DEL ECUADOR

FACULTAD DE INGENIERÍA

CARRERA DE INGENIERÍA CIVIL



PROYECTO DE TITULACIÓN

**TEMA: HORMIGÓN DE ULTRA ALTAS PRESTACIONES EN
EL DISEÑO DE PILOTES PREFABRICADOS DE GRAN
LONGITUD.**

AUTORES:

NICOLÁS FERNANDO JÁTIVA PALMA

DARWIN SANTIAGO LEMACHE CHICAIZA

QUITO DM, JULIO DE 2024

Índice de Contenidos

<i>PROYECTO DE TITULACIÓN</i>	<i>I</i>
<i>Índice de Contenidos</i>	<i>II</i>
<i>Índice de tablas:</i>	<i>IV</i>
<i>Índice de Figuras:</i>	<i>V</i>
1. Capítulo I: Introducción	1
Introducción:	1
1.1. Justificación.	2
1.2. Planteamiento del problema	4
1.3. Objetivo general y específicos.	4
1.4. Alcance.	5
2. Capítulo II: Fundamentación teórica.	6
2.1 Hormigón de ultra altas prestaciones	6
2.2 Producción	11
2.3 Propiedades mecánicas estáticas	20
3. Capítulo III: Fabricación del HUAP en Ecuador	26
3.1 Materiales en el mercado nacional.	26
3.2 Estimación de costo de m³ de HUAP en Ecuador.	29
4. Capítulo IV: Diseño de Pilote	34
4.1 Características mecánicas del HUAP implementado en el análisis.	34
4.2 Sección de los Pilotes	35

4.3 Condiciones geotécnicas utilizadas para el modelamiento.	39
4.4 Resistencia geotécnica.	41
4.5 Modelación matemática del pilote hincado	48
5. <i>Capítulo V: Demanda de HUAP en Ecuador.</i>	67
5.1 Cimentaciones en edificios altos.	67
5.2 Aplicaciones del HUAP.	69
5.3 Proyección de la demanda a futuro.	73
6. <i>Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones</i>	78
6.1 Conclusiones	78
6.2 Recomendaciones	82
<i>Bibliografía:</i>	83
<i>Anexo 1: Rutina Python para el modelamiento dinámico.</i>	88
<i>Anexo 2: Curvas de esfuerzos de cada masa para cada caso.</i>	91
<i>Anexo 3: Cálculo de resistencia del suelo y Dimensionamiento de las secciones de los pilotes.</i>	97

Índice de tablas:

Tabla 1. Ejemplos de compuestos del hormigón de ultra altas prestaciones (Zongjin Li et al., 2023) _____	11
Tabla 2. Propiedades químicas y físicas de la arena de cuarzo, la arena de río y otras materias primas (Caijun Shi et al., 2024a) _____	14
Tabla 3. Propiedades típicas de las fibras (Caijun Shi et al., 2024a) _____	19
Tabla 4. Expresiones del módulo elástico con respecto a la resistencia a la compresión (Caijun Shi et al., 2024c) _____	25
Tabla 5. Costo de materias primas para elaboración de HUAP en Ecuador. _____	30
Tabla 6. Dosificación de muestra maestra (MM) (Ortiz & Vélez, 2021) _____	31
Tabla 7. Costo de materias primas para la elaboración de un metro cúbico de HUAP. ____	31
Tabla 8. Propiedades de las secciones de los pilotes en suelo cohesivo _____	37
Tabla 9. Propiedades de las secciones de los pilotes en suelo de Portoviejo _____	38
Tabla 10. Características geotécnicas por estrato (Vargas Celi & Ulloa Lamán, 2015) ____	39
Tabla 11. Unidades y parámetros geotécnicos (Enríquez Iturralde, 2018) _____	40
Tabla 12. Valores de λ en función de L (m) (Braja M. Das & Nagaratman Sivakugan, 2019) _____	42
Tabla 13. Coeficientes de amortiguamiento, lapso y coeficientes de desplazamiento permanente (Paul W. Forehand & Joseph L. Reese, 1963a) _____	54
Tabla 14. Coeficientes de rigidez empleados en el modelo _____	54
Tabla 15. Datos técnicos de cada martillo analizado. (Voort et al., 2008) _____	55
Tabla 16. Resultados en Suelo medianamente competente de Portoviejo (en kgf/cm ²). ____	57
Tabla 17. Resultados en Suelo Arcilloso en Guayaquil (en kgf/cm ²) _____	58
Tabla 18. Comparativa de desplazamientos máximos permanentes. _____	63
Tabla 19. Edificios más altos del Ecuador _____	76

Índice de Figuras:

Figura 1. Curvas típicas de esfuerzo-deformación en compresión de PC, NFRC, UHPC (Liu et al., 2019)	20
Figura 2. Modos de fallo típicos del HUAP con diferentes volúmenes de fibras y relaciones de aspecto bajo compresión uniaxial. (Le Hoang & Fehling, 2017)	22
Figura 3. Cemento hidráulico Fuente: Holcim Ecuador	26
Figura 4. Arena de cuarzo. Fuente: TESPECON	27
Figura 5. Fibras de polipropileno Fuente: TESPECON	27
Figura 6. Superplastificante N100 Fuente: Sika Ecuador	28
Figura 7. Humo de sílice SikaFume Fuente: Sika Ecuador	28
Figura 8 Gráfico representativo de cantidad material para elaborar 1m ³ de HUAP.	32
Figura 9. Gráfico de porcentaje de costos por material del HUAP	33
Figura 10. Secciones de HUAP y acero para el suelo cohesivo.	37
Figura 11. Secciones de HUAP y acero en suelo de Portoviejo	38
Figura 12. Depósito coluvio-torrenciales en sondeo 11(Enríquez Iturralde, 2018)	40
Figura 13. Perfil Estratigráfico (Suelo cohesivo)	44
Figura 14. Gráfico de presión geo estática por estrato	44
Figura 15. Graficas estratigrafía y presión geostática (Suelo Portoviejo)	46
Figura 16. Modelo de la ecuación de onda. (Lee et al., 1988)	50
Figura 17. Relación resistencia-desplazamiento del suelo utilizada en el análisis de la ecuación de ondas (Paul W. Forehand & Joseph L. Reese, 1963a)	51
Figura 18. Desplazamientos, velocidades, resistencias producidas por cada una de las masas al ser atravesados por la onda.	56

Figura 19. Esfuerzos de compresión en Suelo de Portoviejo con los 4 martillos _____	59
Figura 20. Esfuerzos de compresión en Suelo de Guayaquil con los 4 martillos _____	59
Figura 21. Esfuerzos de tracción en Suelo de Portoviejo con los 4 martillos _____	60
Figura 22. Esfuerzos de tracción en Suelo de Guayaquil con los 4 martillos _____	60
Figura 23. Comparativa de esfuerzos, pilote de HAR con y sin cojín. _____	62
Figura 24. Comparativas de esfuerzos y desplazamientos entre martillos _____	63
Figura 25. Rascacielos Burj Khalifa Figura 26 Sistema de fundación de balsa _____	67
Figura 27. Cimentación de las Torres Petronas Fuente: WolkSoftware _____	69
Figura 28. Puente peatonal Sakata-Mirai _____	70
Figura 29. Refuerzo con HUAP en elementos estructurales del puente Mission. _____	71
Figura 30. Museo de Europa y Civilizaciones Mediterráneas y su fachada. _____	72
Figura 31. Edificio IQON Norte de Quito (Uribe Schwarzkopf, s. f.) _____	74
Figura 32. Mapa de Quito donde se muestran los proyectos de reorganización, según el Municipio. _____	75

1. Capítulo I: Introducción

Introducción:

El hormigón es uno de los materiales de construcción más importantes y ampliamente utilizados en el mundo debido a su excelente resistencia a la compresión, lo que lo hace adecuado para soportar las cargas gravitatorias y laterales en estructuras como edificios, puentes, presas, entre otros. Sin embargo, el hormigón simple presenta limitaciones como su baja resistencia a la tracción, poca ductilidad y susceptibilidad al agrietamiento, lo que restringe su uso en ciertas aplicaciones estructurales.

En las últimas décadas, se ha desarrollado una nueva generación de hormigones de ultra altas prestaciones (HUAP o UHPC *por sus siglas en inglés*), un material avanzado que exhibe propiedades mecánicas y de durabilidad superiores al hormigón convencional. El HUAP puede alcanzar resistencias a compresión superiores a 150 MPa, aproximadamente tres a cinco veces más que un hormigón de alta resistencia tradicional. Esto permite diseñar elementos estructurales más esbeltos y livianos. Gracias a las fibras de refuerzo, posee resistencias a tracción excepcionales de entre 8-15 MPa, mejorando su comportamiento ante esfuerzos de flexión y cortante. Su estructura densa e impermeable lo dota de excelente durabilidad, resistiendo la penetración de agentes agresivos y prolongando su vida útil.

En Ecuador, la industria de la construcción enfrenta desafíos relacionados con el crecimiento urbano vertical y la necesidad de cimentaciones profundas en suelos cohesivos para edificios de gran altura. Los suelos cohesivos blandos presentan baja capacidad portante, requiriendo soluciones constructivas como pilotes hincados para transmitir las cargas de la superestructura al subsuelo competente. En este escenario, los hormigones de alta resistencia como el HUAP cobran especial relevancia al permitir diseñar pilotes de menor sección transversal, pero con alta capacidad estructural, optimizando recursos y facilitando su hinca

en suelos de consistencia blanda a media. Es importante que los pilotes hincados sean altamente resistentes, ya que durante el proceso de hinca experimentan elevados esfuerzos de compresión, flexión y corte debido al rozamiento con el suelo y los impactos durante la instalación. Una alta resistencia a la compresión y tracción les permite resistir estas sollicitaciones sin sufrir daños o fallas prematuras.

El presente trabajo de integración curricular evalúa la factibilidad técnica y económica del uso del HUAP en pilotes hincados para suelos cohesivos en Ecuador, en comparación con hormigones convencionales. Se realizarán diseños estructurales y un análisis de costos que permita determinar las ventajas y desventajas de implementar este material avanzado en el país. Aspectos como el desempeño estructural, la durabilidad, la facilidad constructiva y la sostenibilidad serán analizados integralmente. El trabajo de integración curricular da a conocer el potencial del HUAP en proyectos de edificación de gran altura en Ecuador, contribuyendo a soluciones constructivas óptimas y desarrollo de infraestructura resiliente y duradera.

1.1. Justificación.

En Ecuador, el progreso continuo de la sociedad está impulsando la demanda de edificaciones más altas. Factores como el crecimiento urbano, la gestión del suelo y el desarrollo económico plantean desafíos para las futuras construcciones, las cuales, para maximizar el aprovechamiento del espacio, necesariamente deben elevarse a alturas cada vez mayores.

La ingeniería estructural juega un papel crucial en el diseño de edificios de mayor altura, y los materiales de construcción, incluido el hormigón, deben seleccionarse y

utilizarse de manera apropiada para garantizar la seguridad y estabilidad de la estructura. Si bien, el estudio de los hormigones de ultra altas prestaciones es reciente y no existe aún un amplio conocimiento como es en sí del hormigón armado, sus propiedades han sido estudiadas y se ha logrado conocer las cualidades que poseen en el uso estructural. El HUAP se destaca por su elevada resistencia a la compresión y su tenacidad, lo que le confiere la capacidad de absorber energía antes de fracturarse. Esta cualidad, se considera su uso en cimentaciones, especialmente en pilotes hincados, donde se requiere resistencia mientras son introducidos mecánicamente en el suelo.

En el ámbito estructural, el hormigón de ultra altas prestaciones representa una nueva alternativa para abordar problemas tanto estructurales como de servicio. Comúnmente, se han utilizado secciones compuestas o secciones de gran tamaño en edificios altos, lo que a menudo genera conflictos arquitectónicos. Un hormigón con propiedades mecánicas superiores a las del hormigón convencional permitiría optimizar el uso de materiales (mediante secciones más pequeñas) y resolvería muchas de las discrepancias entre los diseños arquitectónicos y estructurales. Invertir en el uso de hormigones con mejores características ofrecerá una serie de beneficios al país que van desde la seguridad estructural hasta el bienestar de la sociedad ecuatoriana.

Ecuador debe enfocarse en seguir el ejemplo de las estructuras de países que están a la vanguardia pudiendo estos avances brindar al país ventajas en términos de eficiencia, sostenibilidad y calidad de vida para sus ciudadanos.

1.2.Planteamiento del problema

Problema principal:

- ¿Es el uso de hormigón de ultra altas prestaciones una alternativa ventajosa para las futuras construcciones en el Ecuador?

Problemas secundarios:

- ¿Existen en Ecuador los recursos necesarios para la producción de HUAP?
- ¿Cuáles son los costos de producción del HUAP en Ecuador?
- ¿Qué tanto difieren, de forma técnica, los diseños de pilotes prefabricados con HUAP de diseños con otras clases de hormigones?

1.3.Objetivo general y específicos.

Objetivo general:

Determinar si el hormigón de ultra altas prestaciones es una alternativa de solución técnico-económica en la utilización de pilotes prefabricados de gran longitud.

Objetivos específicos:

- Definir qué es un hormigón de ultra altas prestaciones.
- Hallar el costo de la materia prima necesaria para la producción de esta clase de hormigón.
- Estimar el costo unitario de 1 m³ de HUAP.
- Realizar y comparar diseños de pilotes prefabricados de gran longitud utilizando Hormigones de ultra altas prestaciones y hormigones convencionales.

1.4.Alcance.

Esta investigación abarcará tres aspectos clave del uso de hormigón de ultra altas prestaciones (HUAP) en pilotes prefabricados de gran longitud:

1. Análisis bibliográfico de aspectos técnicos y de la teoría, procesos, materiales y costos de producción del HUAP.
2. Análisis estático de un pilote hincado de 40 metros, para determinar las ventajas técnicas del HUAP en estos elementos estructurales.
3. Recopilación de datos de proyectos existentes en Ecuador que requirieron pilotes de gran longitud, para analizar la demanda local y aplicabilidad real del HUAP.

Cubriendo aspectos teóricos, técnicos, económicos y prácticos, esta investigación brindará una visión integral sobre las ventajas y rentabilidad de esta opción en la construcción ecuatoriana.

2. Capítulo II: Fundamentación teórica.

2.1 Hormigón de ultra altas prestaciones

2.1.1 Marco Normativo

En nuestro país no contamos actualmente con normativas que contemplen especificaciones técnicas para el control de calidad del HUAP. De acuerdo con la NEC - SE - HM - Hormigón-Armado: “Los materiales de construcción serán evaluados y verificados por los organismos competentes, para que cumplan con los requisitos, conforme con el Reglamento Técnico Ecuatoriano (RTE INEN) y la Norma Técnica Ecuatoriana (NTE INEN) que se encuentren vigentes; de no existir éstos se remitirán a los requisitos dados en las normas ASTM. En el caso que el RTE INEN o la NTE INEN no se encuentren actualizados, se hará referencia a las normas ASTM vigentes" (Ministerio de desarrollo urbano y vivienda, 2015)

Las normativas implicadas en la fabricación de HUAP son principalmente las siguientes:

- ACI 239-18: Norma del Instituto Americano del Concreto que proporciona guías y recomendaciones sobre materiales, propiedades, diseño, producción, control de calidad y aplicaciones del HUAP.
- ASTM C1240: Norma ASTM que establece los requisitos para el humo de sílice utilizado en mezclas cementantes, incluido el HUAP.
- ASTM C1116: Especificación ASTM para hormigones reforzados con fibras, aplicable al HUAP reforzado con fibras.
- ASTM C1856-17: Norma ASTM que establece los requisitos para los materiales constituyentes y las propiedades del HUAP.

Por otro lado, en el resto del mundo:

- Norma Francesa AFGC (Asociación Francesa de Ingeniería Civil): Recomendaciones para el diseño, producción y control de calidad de HUAP con y sin fibras.
- Norma Alemana (Código Modelo): Lineamientos generales para el uso del HUAP en Alemania, cubriendo diseño, propiedades y aplicaciones.
- GB/T 31387-2015 (China): Norma china que proporciona un código técnico para la aplicación del HUAP en construcciones.
- prSIA 2052-2014 (Suiza): Norma suiza que establece principios y recomendaciones para el uso del HUAP en ingeniería estructural.

2.1.2 Antecedentes y evolución

El concreto de alta resistencia comenzó a utilizarse a mediados de la década de 1960 en el área de Chicago, donde se logró aumentar gradualmente la resistencia a la compresión de 15-20 MPa a 45-60 MPa en un período de aproximadamente 10 años. Sin embargo, se alcanzó una barrera tecnológica alrededor de los 60 MPa debido a las limitaciones de los reductores de agua disponibles en ese momento. El desarrollo de los superplastificantes a fines de la década de 1960 permitió reducir aún más la relación agua/cemento y alcanzar resistencias superiores. A principios de la década de 1980, la llegada del humo de sílice como material cementicio suplementario impulsó un avance significativo, permitiendo fabricar hormigones trabajables con resistencias de 100 a 150 MPa.

El verdadero avance llegó en la década de 1990 con el hormigón reactivo en polvo (RPC), desarrollado por Richard y Cheyrezy en el laboratorio de Bouygues en Francia, que más tarde se conocería como hormigón de ultra altas prestaciones (HUAP), donde se lo denominó hormigón reactivo en polvo (RPC) debido a su alto contenido de humo de sílice activo. El HUAP se caracteriza por eliminar los áridos gruesos, utilizar partículas finas,

relaciones agua/cementos inferiores a 0.24, optimización de la distribución del tamaño de partículas, tratamiento térmico posterior y adición de fibras de acero. Esto permite alcanzar resistencias a la compresión superiores a 150 MPa, llegando incluso hasta 810 MPa en competiciones, junto con excelente trabajabilidad, propiedades mecánicas y durabilidad. En Ecuador, se trata de una tecnología novedosa con escasos estudios al respecto.

2.1.3 Avances más recientes

En Ecuador se han realizado investigaciones sobre el desarrollo de HAR (Hormigones de alta resistencia), con resistencias a la compresión mayores a 100 MPa. Entre las investigaciones más recientes se tiene:

- Diseño de hormigones de alto desempeño: alta resistencia a la compresión, trabajabilidad adecuada y alta resistencia a la erosión - abrasión para obras hidráulicas (Yépez & Calderón, 2014)
- Diseño de una mezcla de hormigón de alta resistencia y su comportamiento en una viga de hormigón armado sometida a cargas de flexión (Bacuilima & Guillén, 2019)
- Diseño y elaboración de hormigones especiales de alto desempeño (Castro & Ojeda, 2019)

Adicionalmente, se han realizado investigaciones sobre la incorporación de nanosílice en los HAR, entre las cuales están:

- Hormigón de alta resistencia con nanosílice (Arellano & Fierro, 2019)
- Análisis experimental de las propiedades físico-mecánicas de un hormigón de alta resistencia elaborado con partículas de nanosílice (Landázuri & Vásconez, 2019)

- Implementación de nanomateriales como Material Cementicio Suplementario (SCM) en el desarrollo de Hormigones de Ultra Alta Resistencia (HUAP). (Ortiz Navos et al., 2021)

Hoy en día se siguen realizando avances alrededor del mundo, entre los más destacables tenemos, el uso de nanomateriales en la fabricación del HUAP y la incorporación de tecnologías de la información para el control de mezclas.

2.1.3.1 Uso de nanomateriales

Comúnmente empleadas en materiales cementosos incluyen nanosílice, nanoalúmina, nanoóxido de hierro, nanoarcillas, nano- CaCO_3 y nano- TiO_2 . Estas nanopartículas actúan como núcleos que facilitan la hidratación del cemento y participan en ella, formando productos hidratados adicionales que densifican la microestructura. Estos efectos modifican tanto la pasta de cemento como las zonas de transición interfacial entre pasta y áridos, que son el punto más débil del hormigón, mejorando así sus propiedades mecánicas y durabilidad. Existe también investigación limitada sobre producir materiales cementantes de tamaño nanométrico mediante molienda de alta energía o síntesis química, logrando mayores resistencias que el cemento Portland regular. Desde finales de los 90, se utilizan nanotubos, nanofibras y nanoplacas de carbono como nano-refuerzos en materiales cementicios para mejorar la resistencia a compresión, flexión y módulo elástico de los elementos. Desde 2010 se suman el grafeno y el óxido de grafeno a esta lista de nano-refuerzos, promocionados como refuerzos 1D o 2D que podrían unir productos de hidratación débiles, interfaces o microgrietas iniciales, mejorando las propiedades mecánicas, especialmente la resistencia a tracción.

2.1.3.2 Uso de ciencia de datos e inteligencia artificial en la tecnología del concreto

La industria del hormigón ha acumulado una gran cantidad de datos que pueden ser aprovechados por la IA para predecir propiedades del material, como las mecánicas, con alta precisión y confiabilidad. Esto permite optimizar el diseño de mezclas a medida, considerando objetivos específicos y el entorno de uso, así como validar modelos numéricos. Las aplicaciones de la IA en este sector son diversas, desde la predicción de la resistencia a la compresión hasta el diseño de mezclas autocompactantes o el desarrollo de nuevos tipos de hormigón con propiedades avanzadas. En definitiva, la IA tiene el potencial de revolucionar la industria del hormigón, mejorando la precisión, la eficiencia y la sostenibilidad de la producción.

Mejorar la eficiencia en el uso de materiales es clave para lograr un hormigón más sostenible. El empleo de hormigones de alta y ultra alta resistencia, junto con técnicas de pretensado, permite reducir considerablemente las secciones de elementos estructurales como columnas y vigas. Las técnicas de pretensado también permiten utilizar tendones de mayor resistencia y reducir la cantidad de acero. Un ejemplo es el edificio de la Comisión de Servicios Públicos de San Francisco, cuyo diseño con hormigón de alta resistencia postensado logró un 30% de reducción en hormigón y refuerzo. Los avances futuros, tanto en materiales como en nuevos métodos constructivos como fabricación aditiva y prefabricación, seguirán mejorando la eficiencia en la utilización de materiales.

2.2 Producción

El hormigón de ultra altas prestaciones (HUAP), como se mencionó anteriormente, se define como un hormigón cuya resistencia a compresión, por norma, debe superar los 150MPa. Se diferencia del hormigón de alta resistencia no únicamente por no contener agregados gruesos, sino también por su gran cantidad de áridos finos y la incorporación de fibras. En este material, ligeras variaciones en los procesos de fabricación, así como en la dosificación de sus compuestos pueden derivar en distintos comportamientos mecánicos, obteniéndose diversas posibles resistencias a compresión. En la tabla 1 están ciertos ejemplos para la dosificación de este hormigón.

Tabla 1. Ejemplos de compuestos del hormigón de ultra altas prestaciones (Zongjin Li et al., 2023)

	Cemento	Agua	Superplastificante	Humo de Sílice	Agregados finos	Arena de cuarzo
No. 1	1	0.28	0.060	0.33	1.43	0.3
No. 2	1	0.15	0.044	0.25	1.10	-

2.2.1 Cemento y materiales de cementación suplementarios.

El cemento Portland se compone principalmente de clinker (producto de la calcinación de una mezcla de piedra caliza, arcilla y otros componentes a altas temperaturas) y yesos molidos. Los componentes principales del clinker de cemento incluyen C_2S , C_3S , C_3A y C_4AF (Trisilicato de calcio, Bisilicato de calcio, Aluminato tricálcico y Ferrito tetracálcico aluminoso). El producto de la hidratación del C-S-H se forma a través de reacciones químicas del C_2S y C_3S con agua, y es el principal contribuyente a la resistencia del hormigón.

Según Wille, para para desarrollar hormigones de ultra alta resistencia se prefiere un cemento con un contenido de C_2S y C_3S superior al 65%. (Cheyrezyet al. 1995).

El contenido de cemento en el HUAP es generalmente de 700 a 1000 kgf/m³ y el cemento utilizado debe ser de baja a media finura y tener un bajo contenido de C_3A , preferiblemente con una alta resistencia a los sulfatos y bajo calor de hidratación. Este tipo de cemento ofrece ventajas debido a su rápido tiempo de fraguado y su alto potencial de resistencia.

En cuanto a los materiales suplementarios empleados en el HUAP, se destacan los siguientes:

2.2.1.1 Humo de Sílice:

El humo de sílice actúa como un micro relleno físico en el HUAP. Con curado térmico a 80 - 90°C contribuye parcialmente a formar fases hidratadas resistentes, generando una microestructura densa e impermeable. Hasta ahora se ha considerado su contribución a la resistencia igual que el cemento ($k = 1$), pese a que su dosis suele exceder el 20% en masa respecto al cemento, situación que requiere mayor investigación. Debido a su enorme superficie específica (100.000 cm²/g) y fuerzas inter-particulares, el humo de sílice determina los requerimientos de agua, superplastificante y propiedades reológicas. Debe contener al menos 96% de SiO₂ amorfo y bajo contenido de carbono. Su dosis debe limitarse a la mínima necesaria para llenar poros según la optimización del empaquetamiento, para evitar pegajosidad y viscosidad excesivas. Los superplastificantes deben desaglomerar las partículas de humo de sílice durante el mezclado

2.2.1.2 Cenizas volantes:

Las cenizas volantes son un subproducto de la quema de carbón pulverizado en plantas generadoras de energía eléctrica. Están compuestas principalmente por partículas esféricas con tamaños que varían desde menos de 0.5 hasta aproximadamente 300 μm . Las cenizas volantes son uno de los materiales cementosos suplementarios más utilizados para la fabricación de HUAP, con un contenido óptimo que oscila entre el 10% y el 60%, dependiendo de la composición química y la proporción de la mezcla de HUAP. La adición de cenizas volantes al HUAP puede mejorar la trabajabilidad debido a su forma esférica, lo que afecta la absorción de superplastificantes en el concreto. Además, el uso de cenizas volantes en HUAP puede retardar la hidratación del cemento (Parque et al., 2021).

Según Yazıcı, el HUAP con alto contenido de escoria y cenizas volantes puede superar los 200 MPa en resistencia, aunque el módulo de elasticidad disminuye si el reemplazo de las cenizas volantes por cemento es superior al 30%.

2.2.2 Agregados.

Por regla general, se emplean diversos polvos finos de cuarzo para lograr el empaquetamiento óptimo de la combinación de partículas en el HUAP. Un factor clave es que estos polvos deben someterse a un fraccionamiento granulométrico altamente selectivo. Por un lado, el polvo de cuarzo exhibe una alta resistencia al desgaste y, por otro, está fácilmente disponible en una amplia gama de granulometrías bien definidas con distintos grados de finura. En contraste, la caliza resulta menos adecuada debido a su menor resistencia y porque el HUAP producido con ella generalmente resulta aún más pegajoso y viscoso.

Tabla 2. Propiedades químicas y físicas de la arena de cuarzo, la arena de río y otras materias primas (Caijun Shi et al., 2024a)

Propiedades	Identificación	Arena de cuarzo	Arena de río	Humos de sílice	Cemento
Composición química (%)	SiO ₂	99.43	77.43	98.86	22.80
	Fe ₂ O ₃	0.0255	4.23	0.14	4.43
	Al ₂ O ₃	0.18	15.71	0.12	4.01
	CaO	0.11	3.60	0.57	65.32
	MgO	0.01	-	0.20	2.07
	Na ₂ O	-	0.04	0.35	0.07
	K ₂ O	0.03	0.05	0.21	0.56
Propiedades físicas	Densidad de empaquetamiento (kg/m ³)	1536.31	1498.09	-	-
	Diámetro medio de partícula d ₅₀ (μm)	300,00	300,00	-	-
	Diámetro máximo de partícula d _{max} (μm)	600,00	600,00	-	-
	Valores de trituración (%)	94.72	94.44	-	-

La arena de cuarzo utilizada en el HUAP representa entre el 40% y el 65% del volumen total. Su uso puede reducir la demanda de cemento y mejorar la fluidez del concreto. Sin embargo, su alto costo y la dificultad para cumplir con los requisitos de gradación óptima limitan su uso extendido en el HUAP.

Otras alternativas viables incluyen la arena de río, arena de mampostería, arena de piedra caliza e incluso agregados finos reciclados, que pueden utilizarse como sustitutos de la arena de cuarzo (Yang et al., 2009; Yang e Ingham, 2000).

Varios autores, como Caijun, han propuesto el uso de arena de río como alternativa a otros agregados debido a su bajo costo. Por ejemplo, la arena de río cuesta aproximadamente 1/15 del costo de la arena de sílice, lo que reduce notablemente el costo del HUAP. Por esta razón, es el agregado fino más utilizado en la fabricación de este tipo de hormigón. En cuanto a sus propiedades, la principal composición mineralógica de la arena de río es dióxido de

silicio, y su gravedad específica y módulo de finura son 2.66 y 2.8 g/cm³, respectivamente (Qi et al., 2018).

Los investigadores señalan que la arena de río puede producir HUAP con resistencia y ductilidad similares a la arena fina de cuarzo, siempre que tengan una curva de tamaño de partícula similar. Cabe mencionar que en zonas costeras la arena de mar ha sido empleada debido a la escasez de recurso de arena de río, sin embargo, las arenas marinas contienen una alta cantidad de iones de cloruro, lo cual puede causar corrosión en las barras o fibras de acero cuando se utilizan en hormigón armado. Por este motivo es necesario eliminar los iones de cloruro antes de utilizar las arenas marinas en el hormigón, lo que incrementa significativamente los costos.

Otros tipos de agregados utilizados en la industria incluyen la arena de vidrio residual, que es un material reciclado proveniente de vertederos y puede emplearse en la fabricación de HUAP, y el polvo de roca reciclado, obtenido de la trituración y pulido de piedra, incluyendo desechos de encimeras de mármol y restos de piedra. Este polvo de roca también se utiliza para reemplazar la arena de cuarzo y la arena de río en HUAP, lo que respalda el desarrollo sostenible de la industria de la construcción (Yang et al., 2020).

2.2.3 Nanomateriales

Los nanomateriales se refieren a materiales ultrafinos con tamaños de partícula en el rango de 1 a 100 nm, mucho más pequeños que los de otros materiales utilizados en el hormigón. El tamaño de partícula es más pequeño que los polvos ordinarios, pero más grande que los grupos atómicos. Se pueden dividir en cuatro grupos, que incluyen nanomateriales cero dimensionales (0D), unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) y tridimensionales (3D). Las nanopartículas 0D incluyen nanocúmulos y nanocristales, como nano-SiO₂, nano-

TiO₂, nano-ZnO y nano-CaCO₃, nano-Al₂O₃. Los nanotubos, nanofibras, nanobarras y nanoalambres pertenecen a los nanomateriales 2D. Los nanomateriales 3D incluyen materiales fibrosos, multicapa y policristalinos, en los que los elementos estructurales 0D, 1D y 2D están en estrecho contacto.

Desde los avances de la nanotecnología aplicados a la construcción, se han incorporado diversos nanomateriales en la producción del HUAP, tales como nano-SiO₂, nano-Al₂O₃, nano-CaCO₃, óxido de grafeno, nanotubos de carbono y nanofibras de carbono. Existen varios mecanismos fundamentales que intervienen en la mejora del rendimiento de los materiales cementosos con nanomateriales:

Efecto de relleno: Los nanomateriales rellenan los espacios y poros entre partículas gruesas y finas, generando un empaquetamiento compacto del sistema sólido.

Efecto de nucleación: Actúan como sitios de nucleación de las fases del cemento, promoviendo una mayor hidratación y formación de productos hidratados.

Efecto químico: Los nanomateriales como nano-SiO₂ y nano-CaCO₃ reaccionan con los cristales de Ca(OH)₂ y/o C₃A, produciendo gel C-S-H y reduciendo la cantidad y tamaño de Ca(OH)₂.

Efecto de refuerzo: Especialmente los nanotubos, cumplen una función de puente, restringiendo la formación y propagación de grietas, lo que mejora las propiedades mecánicas del hormigón.

2.2.3.1 Nano-SiO₂

El Nano-SiO₂ es un polvo cúbico blanco formado por partículas de óxido de silicio de tamaños comprendidos entre 10 y 30 nanómetros, con una densidad de 2.4 g/cm³. Gracias a

sus efectos de nucleación y puzolánicos, la adición del nano-SiO₂ incrementa el calor de hidratación y genera una mayor cantidad de productos hidratados, densificando la microestructura. Los poros de pequeño tamaño, con diámetros entre 0.3 y 40 nm, se ven significativamente reducidos (Ghafari et al. 2014).

Además, optimiza la microestructura de la zona de transición interfacial entre la matriz y el agregado y/o fibras, mejorando la adherencia fibra-matriz y, por consiguiente, las propiedades mecánicas del HUAP. Los efectos de incorporar un 1% de nanosílice en la resistencia y durabilidad del HUAP son similares a los de emplear un 10% de humo de sílice.

2.2.3.2 Nanotubos de carbono

Los nanotubos de carbono pertenecen a los nanomateriales de carbono unidimensionales con una relación longitud-diámetro de hasta 132000000:1, significativamente mayor que la de otros materiales. Actúan como fibras de refuerzo a nanoescala restringiendo la propagación de microgrietas. Aumentan la tenacidad, resistencia a la tracción, flexión e impacto del HUAP.

Mejoran la adherencia fibra-matriz formando puentes de unión más efectivos. Refuerzan la zona de transición interfacial entre la matriz y las fibras. Permiten desarrollar HUAP con mayor ductilidad y resistencia ante cargas extremas.

2.2.4 Aditivos Químicos

2.2.4.1 Superplastificante

El superplastificante es un componente crítico en el HUAP, que desempeña un papel significativo en la reducción del contenido de agua, el mantenimiento de una trabajabilidad

adecuada y la influencia en la capacidad de dispersión de las partículas finas. La función principal del superplastificante es dispersar eficazmente las partículas de cemento y adiciones minerales como el humo de sílice, desenredando los aglomerados y liberando el agua atrapada. Esto permite reducir significativamente la relación agua/ligante manteniendo una trabajabilidad adecuada de la mezcla fresca de HUAP.

Los superplastificantes efectivos utilizados en la fabricación de HUAP se basan en éteres de policarboxilato (PCE). Actualmente existe una amplia variedad de diferentes superplastificantes disponibles en el mercado. No obstante, la mayoría deben optimizarse para lograr una adecuada interacción con los distintos tipos de cemento. La experiencia demuestra que para HUAP con un alto contenido de humo de sílice, los superplastificantes más apropiados son aquellos capaces de desaglomerar eficientemente tanto las partículas de cemento como las otras partículas finas.

2.2.5 Fibras.

La incorporación de fibras en el hormigón proporciona múltiples beneficios, tales como refuerzo estructural, control de fisuras, mejora de la tenacidad y durabilidad. Esto lo convierte en una elección para diversas aplicaciones en el ámbito de la construcción y la ingeniería civil.

Se sabe que el hormigón tiene buenas capacidades de resistencia a la compresión, pero es vulnerable a la tracción. Por esta razón, investigaciones han sugerido que una manera económica de abordar este problema es mediante la adición de fibras. Estas fibras pueden controlar y prevenir la formación de grietas tanto en la etapa plástica como en la endurecida del concreto, lo que a su vez restringe la contracción y mejora la resistencia y la durabilidad

del hormigón con fibras. Los tipos de fibras utilizadas en el hormigón incluyen fibras de acero, fibras sintéticas, fibras naturales, entre otras.

Fibras empleadas comúnmente en el hormigón de ultra altas prestaciones son las presentadas en la siguiente tabla:

Tabla 3. Propiedades típicas de las fibras (Caijun Shi et al., 2024a)

Tipos	Diámetro (μm)	Densidad Relativa (g/cm³)	Resistencia a la tracción (MPa)	Módulo de Young (GPa)	Elongación (%)
-	250 - 1000	7.8	280 - 2800	200 - 250	0.5 - 40
Acrílico	5 - 17	1.18	800 - 950	16 - 23	9 - 11
Poliéster	10 - 80	1.38	735 - 1200	6 - 18	11 - 15
Polietileno	800 - 1000	0.96	200 - 300	5 - 6	3 - 4
Polipropileno	20 - 70	0.91	300 - 770	3.5 - 11	15 - 25
Nylon	23	1.16	900 - 960	4.2 - 5.2	18 - 20
Alcohol Polivinilo	1.30	1.30	600 - 2500	5 - 50	6 - 17
Aramida	10 - 12	1.44	2500 - 3100	60 - 120	2.1 - 4.5
Vidrio	10 - 16	2.74	1400 - 2500	70 - 80	2.5 - 3.5
Amianto	≤ 0.5	2.75	500 - 980	84 - 140	0.3 - 0.6
Lana de roca	2.7	2.7	490 - 770	70 - 119	0.6
Madera	25 - 400	1.40	50 - 1000	14 - 40	-
Carbón	7 - 18	1.75	1800 - 4000	200 - 480	1.2 - 1.6

Las propiedades mecánicas del HUAP con fibras están influenciadas por varios factores, como el tipo de fibra, su contenido, geometría, longitud, dispersión y la interacción entre la fibra-matriz del hormigón. Incrementar el volumen de fibras de acero puede aumentar la ductilidad del hormigón con fibras. (Kang et al., 2010)

La mayoría de las fibras fabricadas a partir de materiales sintéticos como polipropileno, polietileno, poliéster, nailon, entre otros, tienen como propósito es proteger y mitigar los efectos del agrietamiento debido a la contracción plástica en el hormigón con fibras.

Para alcanzar la resistencia a la compresión requerida, en ocasiones se requiere calentar el material después de que haya fraguado y aplicar presión durante o antes del fraguado. Estos procesos adicionales permiten una mayor hidratación y una microestructura más compacta y densa, lo cual aporta mayor resistencia.

2.3 Propiedades mecánicas estáticas

2.3.1 Comportamiento a compresión

El HUAP exhibe un comportamiento a compresión significativamente mejorado en comparación con el concreto normal y el concreto de alto desempeño. La Figura 1 compara las curvas típicas de esfuerzo-deformación a compresión del concreto simple (HS o PS, *Plain concrete*), el concreto reforzado con fibras normales (HSRF o NFRC, *Normal fiber reinforced concrete*) y el Hormigón de ultra altas prestaciones (HUAP o UHPC, *Ultra high performance concrete*). Se pueden identificar cuatro etapas principales, a saber, deformación elástica, fisuración inicial, fisuración visible y falla, que se presentan como las ramas OA, AB, BC y CD, respectivamente.

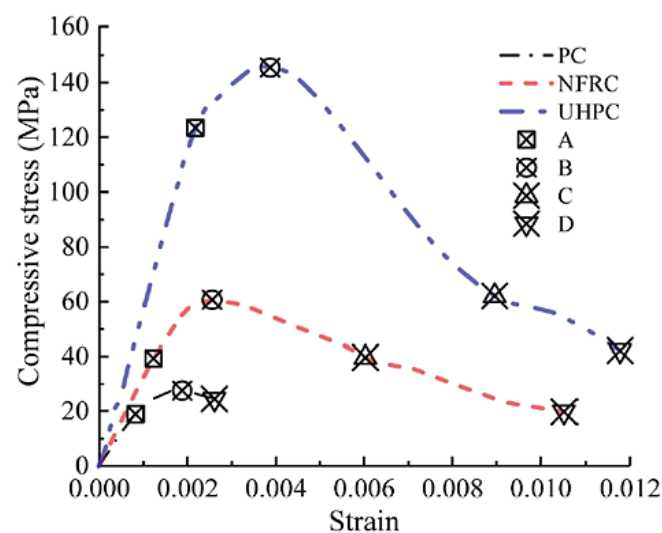


Figura 1. Curvas típicas de esfuerzo-deformación en compresión de PC, NFRC, UHPC (Liu et al., 2019)

Rama OA: El esfuerzo aumenta linealmente con el incremento de la deformación, y se observa una sección de deformación elástica, donde se inician y propagan grietas desde microgrietas intrínsecas y/o poros en las zonas de transición interfacial. La pendiente de la parte ascendente se considera generalmente como el módulo elástico del concreto, que depende principalmente de la resistencia a la compresión del concreto. El HS generalmente exhibe un límite proporcional del 30% de la resistencia a compresión y una deformación última de aproximadamente 0.002. El HUAP muestra un límite lineal de hasta 70% - 80% o incluso 90% - 95% del esfuerzo de compresión último. (Caijun Shi et al., 2024a)

Rama AB: El esfuerzo aumenta no linealmente con el aumento de la deformación hasta el esfuerzo pico. Se puede observar una gran red de grietas visibles en las muestras. La no linealidad se atribuye principalmente a la coalescencia de microgrietas en las interfaces pasta-agregado. Las muestras de HS bajo compresión muestran grietas internas e incluso externas, mientras que las muestras de concreto reforzado con fibras o HUAP pueden no exhibir grietas visibles y externas debido al efecto de refuerzo de las fibras. (Liu et al., 2019)

Rama BC: Después de alcanzar el esfuerzo pico en el punto B, la primera porción descendente de la curva esfuerzo-deformación del concreto se puede monitorear usando una máquina controlada por desplazamiento. El esfuerzo se reduce rápidamente hasta el punto de inflexión C. El esfuerzo en C es aproximadamente el 50% del esfuerzo pico para HS. Se pueden observar grietas obvias en esta rama, y continúan extendiéndose con el aumento de la deformación hasta formar una grieta principal conectada en toda la sección.

Rama CD: Después del punto de inflexión C, la tasa de disminución del esfuerzo se ralentiza a medida que aumenta la deformación, y luego las muestras fallan.

Distintos de tipos de falla se han observado, en múltiples laboratorios alrededor del mundo, en función del porcentaje de fibras respecto al cilindro y relación de aspecto de estas como muestra la figura 2 ((a) matriz de HUAP sin ninguna fibra; (b) HUAP con 1.5% de fibras proporción de 13/0.75; (c) HUAP con 1.5% de fibras proporción de 20/0.25 (d) HUAP con 3% de fibras proporción 13/ 0.175; (e) HUAP con 3% de fibras proporción de 20/ 0.25).

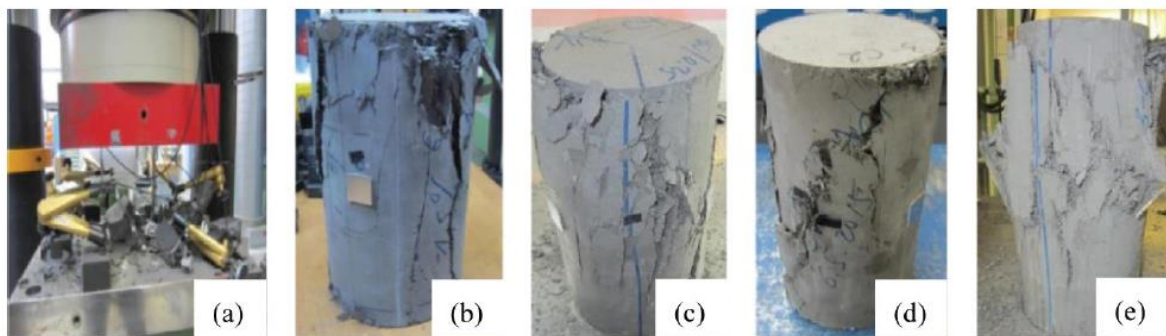


Figura 2. Modos de fallo típicos del HUAP con diferentes volúmenes de fibras y relaciones de aspecto bajo compresión uniaxial. (Le Hoang & Fehling, 2017)

En el HUAP, ligeras variaciones en los procesos de fabricación, curado y dosificación de compuestos pueden derivar en distintos comportamientos mecánicos y resistencias a compresión, específicamente:

Relación agua/cemento: Pequeños cambios en esta relación afectan significativamente la hidratación del cemento y la densidad de la matriz cementante, lo que influye directamente en la resistencia final.

Grado de empaque de partículas: Variaciones en la granulometría y proporción de los materiales cementantes, humo de sílice y agregados pueden generar una estructura más o menos compacta, incidiendo en la resistencia.

Orientación y dispersión de fibras: La alineación y distribución homogénea de las fibras de refuerzo es fundamental para el control de la fisuración y el aporte de ductilidad y tenacidad.

Tratamientos térmicos: Diferencias en los regímenes de temperatura y presión durante el curado afectan el grado de hidratación y la formación de fases resistentes.

Adiciones minerales: Los cambios en el tipo y dosis de adiciones como humo de sílice modifican la reactividad puzolánica y la microestructura de la matriz cementante.

Procedimientos de mezclado: Las variaciones en tiempos, secuencias y energías de mezclado influyen en la dispersión de fibras y compactación de la mezcla.

Al tratarse de un material de muy alta compacidad y con alto contenido de adiciones, las menores desviaciones en formulación y procesos productivos del UHPC repercuten significativamente en el desarrollo de sus propiedades mecánicas excepcionales. (Caijun Shi et al., 2024a)

2.3.2 Modulo de elasticidad

El módulo de elasticidad de un material es una manera de medir su rigidez. Para evaluar esto, se aplica una fuerza al material y se registran los efectos resultantes.

Posteriormente, se puede calcular el módulo de elasticidad dividiendo la tensión aplicada al material por la deformación elástica resultante. (IndustrialPhysics, 2024)

Aïtcin señala que es crucial entender el módulo de elasticidad del hormigón desde una perspectiva de diseño estructural, ya que permite calcular las deformaciones de los diferentes elementos que componen una estructura. Con respecto al modo de medición de este módulo, no es una prueba tan sencilla pues se tiene que medir simultáneamente la carga aplicada y la deformación axial generada por esta carga esto implica el uso de dispositivos electrónicos

para controlar la tasa de deformación, también implica el uso de un registrador X-Y para dibujar la curva tensión-deformación necesaria para medir el módulo de elasticidad.

El HUAP se caracteriza por tener un módulo elástico alto de 40 a 60 GPa valores que son entre un 20 % y un 70 % más altos que los del hormigón normal y el hormigón de alto rendimiento (Ahmad et al. 2015; Hannawi et al.2016; Wang et al. 2015). Este módulo se considera un parámetro fundamental en el diseño y análisis de estructuras de hormigón, puede influir en la deformación del hormigón en la fase elástica y en el agrietamiento inicial. Con respecto al método de medición de este módulo más sencillo es mediante ecuaciones empíricas respecto a su resistencia a la compresión, sin embargo, cabe recalcar que estos son valores estimados y no del todo exactos. (Caijun Shi et al., 2024b)

Es conocido que el módulo de elasticidad del hormigón está influenciado por los materiales que lo componen y sus proporciones empleadas en su elaboración, así como el módulo de elasticidad está relacionado con la capacidad a compresión del hormigón. Predecir el módulo de elasticidad del HUAP es complicado debido a las características de este material varía en función del tamaño de agregados, porosidad y dureza. (Nawy, 1996a).

Comparado con las mediciones de resistencia a la compresión utilizadas para caracterizar f'_c , la prueba para medir el índice de Poisson definitivamente se considera más complicada y exigente, ya que implica la medición de la deformación lateral además de las mediciones anteriores. Para evitar esta complejidad, ingenieros e investigadores han buscado atajos que les permitan predecir el módulo de elasticidad del hormigón, ya sea mediante un enfoque teórico o empírico. En este último caso, suelen expresar el módulo de elasticidad en función de la resistencia compresiva. (Aïtcin, 2004).

Existen métodos analíticos para calcular el módulo de elasticidad del HUAP por diferentes autores los modelos más sencillos analizan el agregado y la pasta de cemento como contribuyentes en el módulo elástico soportando la tensión y la deformación.

Algunos métodos analíticos del módulo elástico del HUAP son definidos en la siguiente tabla:

Tabla 4. Expresiones del módulo elástico con respecto a la resistencia a la compresión
(Caijun Shi et al., 2024c)

No.	Ecuación	Notas	Ref.
1	$E_c = 9.5\sqrt[3]{f_{cu}}$	UHPC curado con calor, $f_{cu} \geq 140$ MPa	Recomendaciones interinas (2002)
2	$E_c = 19\sqrt[3]{\frac{f_{cu}}{10}}$	UHPC sin áridos gruesos	Ma et al. (2004)
3	$E_c = 21.902\sqrt[3]{\frac{f_{cu}}{10}}$	UHPC con áridos gruesos de basalto	Ma et al. (2004)
4	$E_c = \frac{1}{0.0172 + 0.8364/f_{cu}}$	$60 \text{ MPa} \leq f_{cu} \leq 220 \text{ MPa}$	Guo et al. (2017)
5	$E_c = 8.01f_{cu}^{0.36}$	$31 \text{ MPa} \leq f_{cu} \leq 235 \text{ MPa}$ $25 \text{ GPa} \leq E_c \leq 68.3 \text{ GPa}$	Alsaman et al. (2017)
6	$E_c = 4.2\sqrt{f_{cu}}$	UHPC con áridos triturados, $f_{cu} = 177 \text{ MPa}$	Sritharan et al. (2003)
7	$E_c = 4.36\sqrt{f_{cu}}$	$f_{cu} \approx 130 \text{ MPa}$	Ahmad et al. (2015)
8	$E_c = 3.84\sqrt{f_{cu}}$	$126 \leq f_{cu} \leq 193 \text{ MPa}$	Graybeal (2007)

3. Capítulo III: Fabricación del HUAP en Ecuador

3.1 Materiales en el mercado nacional.

3.1.1 Materias primas disponibles

Holcim Ecuador cuenta con varios tipos de cemento hidráulico entre los cuales está el cemento Holcim Ultra Durable HS que es un cemento hidráulico con alta resistencia a los sulfatos fabricado acorde a la norma ecuatoriana NTE INEN 2380, equivalente a la norma ASTM C1157. Se caracteriza por tener igual resistencia que el cemento Tipo GU (uso general), siendo un concreto resistente a los sulfatos considerando lo recomendado en el ACI 201.2R” Guía para la Durabilidad del Hormigón” y Norma Ecuatoriana de la construcción capítulo NEC_SE_HM “Estructuras de hormigón armado”.



Figura 3. Cemento hidráulico Fuente: Holcim Ecuador

El agregado que conforma el HUAP como se mencionó anteriormente son arenas silíceas de cuarzo y calizas entre otras, debido a que son agregados fuertes y químicamente estables. En el mercado se cuenta con la arena de cuarzo, misma que es sus especificaciones técnicas destaca por tener una granulometría cuidadosamente controlada de geometría redonda, resistente ante el desgaste y que no se deteriora a la intemperie o en un medio húmedo.



Figura 4. Arena de cuarzo. Fuente: TESPECON

La implementación de fibras da al HUAP una característica superior al hormigón normal que es mejorar la resistencia a la tracción y ductilidad. TESPECON (Tecnología Especializada para la Construcción) ofrece fibras de polipropileno las que según sus especificaciones técnicas dan una rápida y efectiva solución para evitar las fisuras en el hormigón. Caijun en su tabla Propiedades típicas de las fibras detalla que las fibras de polipropileno cuentan con un diámetro de 20 a 70 μm y una resistencia a la tracción de 300 hasta 770 MPa considerándose así su utilidad para la fabricación del HUAP.



Figura 5. Fibras de polipropileno Fuente: TESPECON

El HUAP necesariamente debe fabricarse con la ayuda de plastificantes debido su muy baja relación agua-cemento, relación que influye directamente en su resistencia a la compresión, por este motivo en el mercado existen los superplastificantes reductores de agua de alto poder. Sika entre su catálogo ofrece el Sikament N-100 que es un aditivo líquido, color café, compuesto por resinas sintéticas. De acuerdo con sus especificaciones técnicas

este aditivo o permite reducir hasta un 30% del agua de la mezcla, consiguiendo la misma manejabilidad inicial y obteniendo un incremento considerable de las resistencias siendo ideal para la elaboración de prefabricados y concretos de altas resistencias finales.



Figura 6. Superplastificante N100 Fuente: Sika Ecuador

El humo de sílice también conocido como microsíllica es un polvo compuesto por diminutas partículas esféricas. Uno de los distribuidores de este material en el país es Ferrekret, quienes dicen que es una adición puzolánica para la fabricación de concreto de alta resistencia y rendimiento. También Sika Ecuador distribuye este producto bajo el nombre de SikaFume. El humo de sílice además disminuye la permeabilidad del concreto a los iones de cloruro, lo cual ayuda a proteger el acero de refuerzo contra la corrosión, especialmente en áreas con altos niveles de cloruros, como zonas costeras, carreteras y regiones con alta humedad ambiental.



Figura 7. Humo de sílice SikaFume Fuente: Sika Ecuador

El agua es esencial en la fabricación de concreto, pues afecta directamente la calidad y el desempeño del producto final. En Ecuador, la Norma Ecuatoriana de la Construcción NEC-SE-DSR regula el uso del agua en la fabricación de hormigón. Esta normativa establece criterios técnicos y requisitos para la elaboración del concreto, incluyendo especificaciones para el agua utilizada. La NEC-SE-DSR detalla parámetros como la potabilidad y la ausencia de contaminantes perjudiciales, que son fundamentales para garantizar la resistencia y durabilidad del hormigón. El seguimiento de la normativa es crucial para asegurar el uso adecuado del agua y cumplir con los estándares de calidad en la fabricación de hormigón, siendo así empleada agua potable para cumplir estándares de calidad.

3.1.2 Materias primas no disponibles.

Después de haber realizado una indagación de las materias primas disponibles en el país, el material que no es de fácil adquisición por su naturaleza, poco uso en la industria de la construcción actual y proceso de fabricación especializado son los Nanotubos de carbono. Nanjing XFNANO Materials Tech Co., Ltd. Se encarga de producir y exportar para el Ecuador este material que consiste tubos concéntricos de múltiples capas laminadas de átomos de carbono, dando según ficha técnica propiedades como mejora de la resistencia, flexibilidad, termoestabilidad y resistencia a la corrosión al ser adicionado a la fabricación del HUAP. (Nanjing XFNANO Materials Tech Co., 2017). (Ortiz & Vélez, 2021a)

3.2 Estimación de costo de m³ de HUAP en Ecuador.

Para determinar los costos de los materiales necesarios para la elaboración del Hormigón de Ultra Altas Prestaciones, se realizó una investigación de precios locales. Este proceso implicó que los datos obtenidos sean precisos y actualizados para el proyecto. A

través de la identificación de materiales, la investigación de proveedores locales disponibles y la comparación de costos de los diferentes proveedores para un mismo material, se puede asegurar que los datos de costos sean correctos para la elaboración del HUAP.

3.2.1 Costo por material.

Tabla 5. Costo de materias primas para elaboración de HUAP en Ecuador.

Material	Distribuidor	Cantidad (kg)	Precio (USD)
Cemento Hidráulico	Holcim	50	8.56
Arena de cuarzo	TESPECON	15	9.90
Humo de sílice	Sika	15	47.23
Superplastificante	Sika	10	27.58
Agua	Red pública de agua	998	0.45

3.2.2 Costo de manufactura

Ortiz y Vélez en su trabajo “Implementación de nanomateriales como Material Cementicio Suplementario (SCM) en el desarrollo de Hormigones de Ultra Alta Resistencia (UHPC)” tomaron como base para la dosificación del HUAP al ACI 1996. Tras pasar por un proceso de replicación y disminución en su relación W/C manejando una fluidez con los materiales disponibles en Ecuador concluyeron que esta dosificación dio mejores resultados frente a las demás ensayadas en laboratorio, a esta dosificación se le abrevió como MM (muestra maestra) con la cual se ensayaron 119 especímenes cúbicos en un rango de edad de 1 a 90 días para ensayos a compresión.

Tabla 6. Dosificación de muestra maestra (MM) (Ortiz & Vélez, 2021)

Materiales	MM*	% Peso Total**
Cemento Hidráulico	1.000	32.96 %
Arena Fina	1.432	47.20 %
Humo de sílice	0.325	10.71 %
Superplastificante	0.041	1.33 %
Agua	0.237	7.80 %

*Valores referenciales respecto al peso de cemento
**Valores referenciales respecto al peso total de la mezcla

Tabla 7. Costo de materias primas para la elaboración de un metro cúbico de HUAP.

Material	Relación	MM (kgf/m³)	Costo (USD)	Porcentaje Del Costo (%)
Cemento Hidráulico	1,000	736,08	126,02	7,599
Arena de cuarzo	1,432	1.054,07	695,69	41,952
Humo de sílice	0,325	239,23	753,26	45,424
Superplastificante	0,041	30,18	83,24	5,019
Agua	0,237	174,45	0,08	0,005
TOTAL			1.658,27	

El cálculo de la cantidad de materiales necesarios para la elaboración del hormigón se realizó a partir de la dosificación agua-cemento, proporción que garantiza la trabajabilidad y las propiedades mecánicas requeridas del hormigón todo esto fundamentado por ensayos a las probetas de HUAP para dichas dosificaciones. A partir de esta relación, se establecieron las cantidades específicas de agua y cemento por metro cúbico de hormigón. Posteriormente, se calcularon las proporciones de los agregados finos y aditivo necesarios para completar la mezcla, manteniendo un equilibrio adecuado entre los componentes para cumplir con las especificaciones técnicas del proyecto.

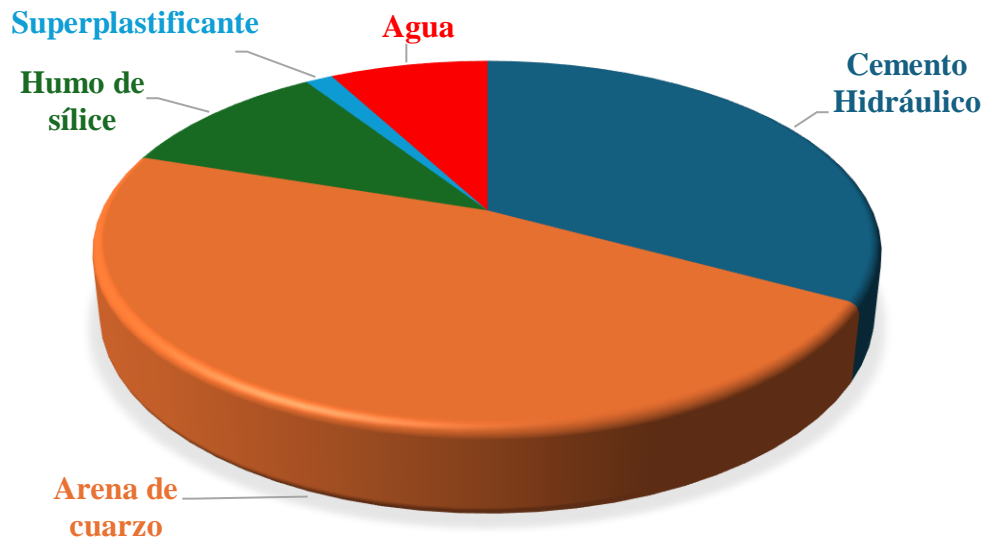


Figura 8 Gráfico representativo de cantidad material para elaborar 1m³ de HUAP.

Se puede observar en la Figura 8, que el HUAP está compuesto más por agregado fino que sus demás materiales, superando así a su vez a la cantidad de cemento. Sin embargo, el humo de sílice que a pesar de requerir menor cantidad que el cemento o la arena de cuarzo, en el tema de costos necesita de mayor inversión, esto se puede ver reflejado en el siguiente gráfico en donde el humo de sílice representa el 45% del costo total para 1m³ de HUAP como materia prima superando así a los demás materiales.

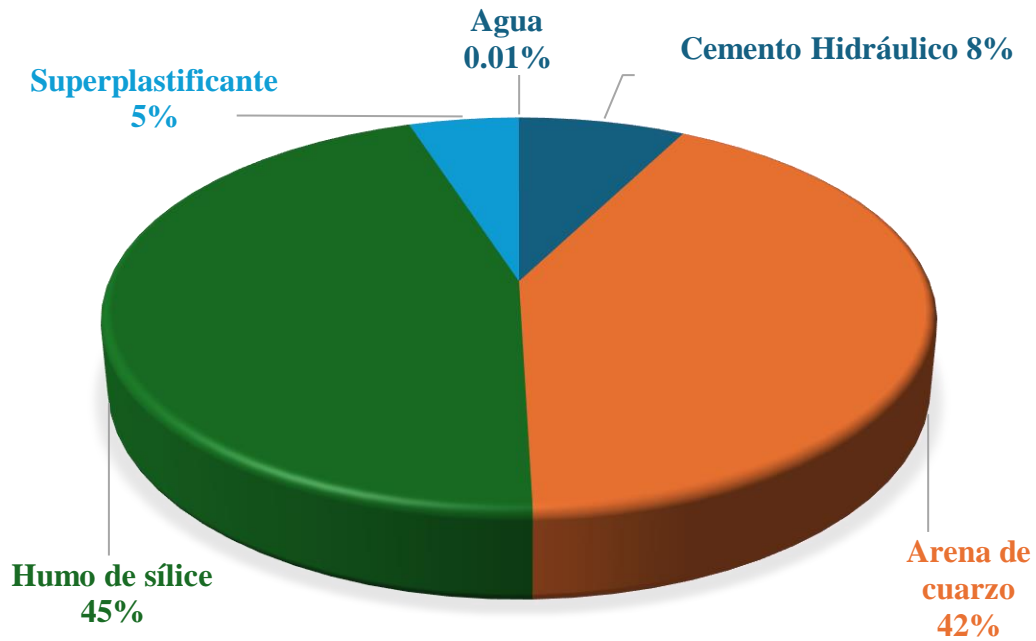


Figura 9. Gráfico de porcentaje de costos por material del HUAP

El gráfico de porcentaje de costos por material del HUAP facilita la identificación de los materiales que representan los mayores costos, permitiendo optimizar el uso de esos recursos a la hora de adquirir materias primas. Además, al desglosar los costos por componente, el gráfico ayuda a detectar oportunidades de ahorro como negociar mejores precios con proveedores en los casos en donde se necesita mayores cantidades.

4. Capítulo IV: Diseño de Pilote

Para que un pilote o una cimentación con pilotes cumpla adecuadamente su función prevista, debe diseñarse para resistir todos los modos de falla. Éstos incluyen:

- Falla de la capacidad portante del sistema pilote-suelo.
- Asentamiento vertical excesivo debido a la compresión y consolidación del suelo subyacente.
- Desplazamiento horizontal excesivo o inestabilidad debido a cargas y soporte laterales inadecuado del suelo.
- Falla estructural del fuste del pilote o su conexión con la zapata.

De estos diversos modos de falla, solo el último es de naturaleza estructural. La capacidad final de un solo pilote o grupo de pilotes generalmente se rige por la resistencia del sistema pilote-suelo, no por la resistencia estructural del pilote. Por lo tanto, es necesario considerar cuidadosamente la interacción del sistema pilote-suelo en el diseño de cualquier fundación por pilotes. De ahí que el papel del ingeniero geotécnico y su relación con el ingeniero estructural sean extremadamente importantes para garantizar un diseño exitoso de la fundación. (Christopher D. White et al., 2004)

4.1 Características mecánicas del HUAP implementado en el análisis.

Tras pruebas de resistencia a compresión a los 28 días en muestras cilíndricas de acuerdo con las especificaciones de la Norma ASTM C39, Ortiz y Vélez, investigadores de la universidad de Cuenca, constataron que la resistencia promedio de la muestra MM para el curado a temperatura ambiente (18 °C) y temperatura controlada (60 °C) es de 137.49 MPa y

164.09 MPa respectivamente. Someter la MM a un régimen de curado térmico incrementó la resistencia aproximadamente un 19% respecto al curado a temperatura ambiente.

El Módulo de elasticidad según esta dosificación bajo curado natural fue de 53.44 GPa y bajo curado a temperatura controlada de 53.76 GPa.

El peso específico promedio fue de 2143 kgf/m³.

Para el análisis del pilote de hormigón de alta resistencia, se considerará un $f'_c = 700$ kgf/cm², cuyo modulo de elasticidad para hormigones de resistencias comprendidas entre 6000 y 12000 psi se puede emplear la expresión:

$$E_c = (40000\sqrt{f'_c} + 10^6) \left(\frac{\omega_c}{145}\right)^{1.5} \quad (\text{Nawy, 1996b}) \quad (1)$$

Por lo tanto, $E_c = (40000\sqrt{10000\text{psi}} + 10^6) \left(\frac{156.21\text{bf/ft}^3}{145}\right)^{1.5} = 5590357.032$ psi

$E_c = 391324.9922$ kgf/cm².

Para el análisis del pilote de HS (Hormigón simple), se considerará un hormigón de un $f'_c = 240$ kgf/cm², cuyo módulo de elasticidad se obtendrá mediante las expresiones propuestas por la ACI 318-19.

Para el análisis del pilote de acero, se considerará un módulo de elasticidad de:

$$E_s = 2.04 \times 10^6 \text{ kgf/cm}^2$$

4.2 Sección de los Pilotes

Se comparan las dimensiones de la sección de pilote de HUAP con forma de H cónica con un pilote de acero HP como se puede ver en la Figura 10. Con el uso de una rutina programada en Python, se consiguió un predimensionamiento de los cuatro tipos de pilotes; Un pilote de Hormigón de ultra altas prestaciones (HUAP), un pilote de acero, un pilote de HAR (Hormigón de alta resistencia con $f'_c = 700$ kgf/m²) y un pilote de HS (Hormigón

simple con $f'_c = 240 \text{ kgf/cm}^2$) en función del área mínima requerida para resistir una carga de 350 Tonf en ambos tipos de estratos. Esta demanda de 350 Tonf es un valor impuesto que se estimó a partir de un cálculo aproximado del peso transmitido al suelo por un edificio de 46 pisos. Considerando un espesor de losa aproximado de 0.3 m y un área por piso de 2640 m^2 :

Cálculo de la Carga Total por Piso:

$$\text{Carga total por piso} = (0.3 \text{ m} * 2400 \text{ kgf/m}^3) \times 2640 \text{ m}^2 = 1900 \text{ Tonf}$$

Cálculo de la Carga Total del Edificio:

$$\text{Carga total del edificio} = 1900 \text{ Tonf/Piso} \times 46 \text{ Pisos} = 87436.8 \text{ Tonf}$$

$$Q_u = \frac{\text{Carga total del edificio}}{\#\text{Pilotes}}$$

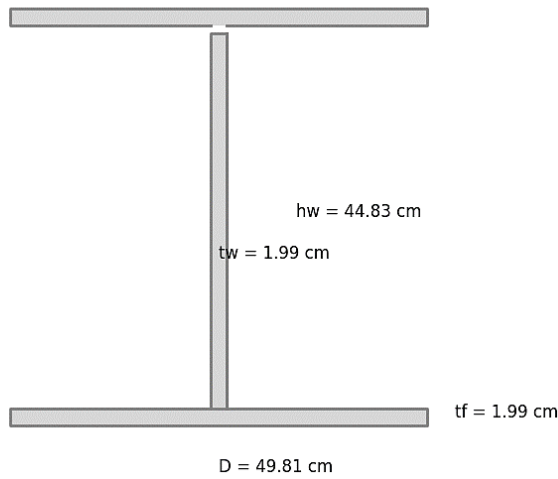
Para esta estimación simple, nos impones una cantidad arbitraria de 250 pilotes, sin embargo, el número de pilotes requeridos dependerá del área de la cimentación y de otros parámetros geotécnicos.

$$Q_u = \frac{87436.8}{250} = 349.75 \text{ Tonf/Pilote}$$

Se realizó por lo tanto el predimensionamiento en función de la resistencia estática requerida tanto para el suelo cohesivo como para el suelo medianamente competente, es decir, dos secciones. Considerando una demanda axial $Q_u = 350 \text{ Tonf}$.

Para el suelo cohesivo se requirió un pilote de 40 metros de longitud, el área requerida de la sección es por lo tanto es, $A_p = 0.25 \text{ m}^2$ y la longitud de cada lado es $D = \sqrt{A_p} = 0.5 \text{ m}$.

Sección Transversal del Pilote de UHPC



Sección Transversal del Pilote de UHPC

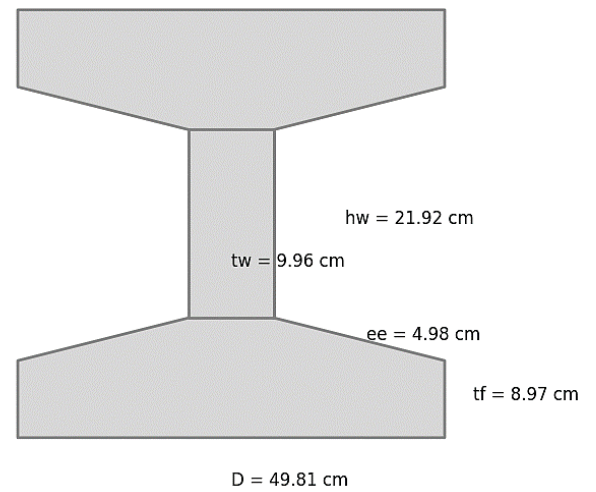


Figura 10. Secciones de HUAP y acero para el suelo cohesivo.

Siendo,

D = Longitud del patín;

hw = Longitud del alma;

tw = Espesor del alma;

tf = Espesor del patín;

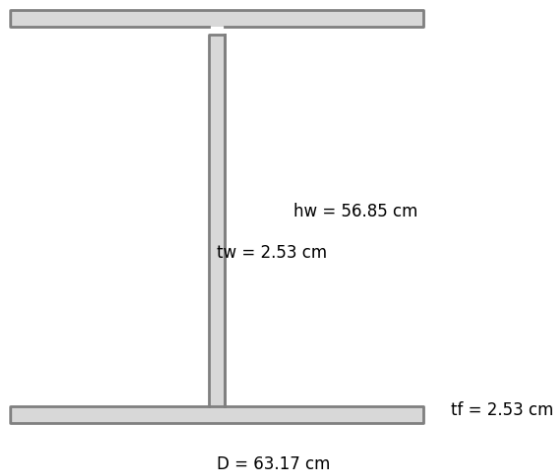
ee = Altura vertical de la cartela.

Tabla 8. Propiedades de las secciones de los pilotes en suelo cohesivo

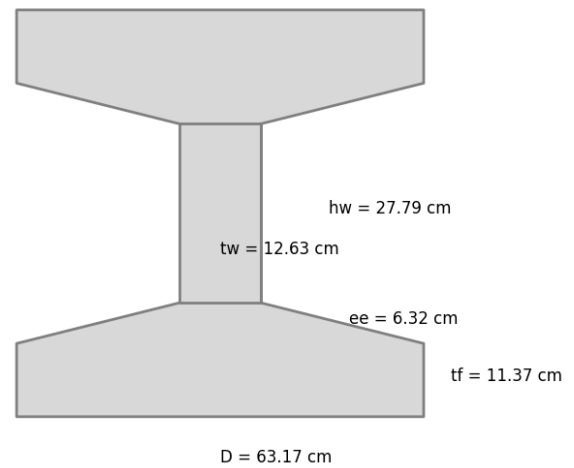
Propiedad	Pilote de acero HP 50 x 225	Pilote de HAR	Pilote de HUAP	Pilote de HS
Área total (cm ²)	290	290	347	2500
Peso kg/m	224.75	224.75	87.1	600
Momento de inercia x – x (cm ⁴)	125704.2	125704.2	314077.5	520833.33

Para el suelo de Portoviejo se requirió un pilote de 25 metros de longitud, el área requerida de la sección es por lo tanto es, $A_p = 0.4 \text{ m}^2$ y la longitud de cada lado es $D = \sqrt{A_p} = 0.632 \text{ m}$.

Sección Transversal del Pilote de UHPC



Sección Transversal del Pilote de UHPC

**Figura 11.** Secciones de HUAP y acero en suelo de Portoviejo

Los detalles de las secciones correspondientes a este suelo se encuentran en la tabla 9.

Tabla 9. Propiedades de las secciones de los pilotes en suelo de Portoviejo

Propiedad	Pilote de acero HP 63 x 360	Pilote de HAR	Pilote de HUAP	Pilote de HS
Área total (cm ²)	462.84	462.84	2266.32	4000
Peso kg/m	361.46	361.46	565	960
Momento de inercia x-x (cm ⁴)	320669.51	320669.51	1048640.205	1333333.333

La sección de hormigón simple consiste únicamente en un rectángulo de 0.5m x 0.5m para el suelo cohesivo y de 0.63m x 0.63m para el suelo de Portoviejo. Por otro lado, el pilote de hormigón de alta resistencia tendrá la misma sección que el pilote de HUAP. La elección de la geometría está basada en las consideraciones propuestas por la tesis de Voort, en donde se hace hincapié en la importancia de las facilidades constructivas. (Voort et al., 2008)

4.3 Condiciones geotécnicas utilizadas para el modelamiento.

Para demostrar la factibilidad constructiva de un pilote hincado, es necesario una comparación cuantitativa de las solicitaciones máximas que se producirán durante el hincado. Para ello compararemos los resultados derivados de dos estratigrafías, utilizaremos datos de suelos arcillosos de la ciudad de Guayaquil y de suelos medianamente competentes de la ciudad de Portoviejo. La estratigrafía de Guayaquil está basada en la tesis titulada, “Perfil geológico-geotécnico a partir de perfiles geofísicos y columnas estratigráficas en una zona norte de los depósitos deltaicos-estuarinos en guayaquil”. (Vargas Celi & Ulloa Lamán, 2015)

Por otro lado, la estratigrafía de Portoviejo se basó en la tesis, “Zonificación De La Susceptibilidad De Fenómenos De Remoción En Masa Provocados Por Terremotos En La Ciudad De Portoviejo”. (Enríquez Iturralde, 2018)

En este estudio, se identificaron suelos denominados tipo I en el sector del Suburbio de Guayaquil. Estos suelos consisten en potentes depósitos de suelos arcillosos que varían en consistencia de blanda a firme. La tabla 9 muestra las características geotécnicas por estrato hasta una profundidad de 40 metros, misma que la longitud del pilote que se analizará.

Tabla 10. Características geotécnicas por estrato (Vargas Celi & Ulloa Lamán, 2015)

Material	Profundidad	γ (kN/m ³)	K	E50' (MPa)	Su (kN/m ²)	Φ
Arcilla 1	0 -1.35	16	4	50	26	X
Arcilla 1,5	1.35 – 2.70	16	3	50	26	X
Arena 1	2.70 – 5.575	18	2	15	X	34
Arena 1,5	5.575 – 8.45	18	1.5	17	X	30
Arcilla 2	8.45 – 10.25	16	1	15	20	X
Arena 2	10.25 – 12.95	18	0.5	12	X	30
Arcilla 3	12.95 - 40	16	1	12	15	x

Para la estratificación del suelo medianamente competente, los sondeos están situados en los abanicos creados por los afluentes del Río Portoviejo, lo que permite definir la unidad con parámetros geotécnicos como se muestra en la tabla 11. Los registros correspondientes muestran principalmente suelos limo-arcillosos con baja resistencia al corte y suelos limo-arenosos intercalados como podemos ver representado en la figura 12.

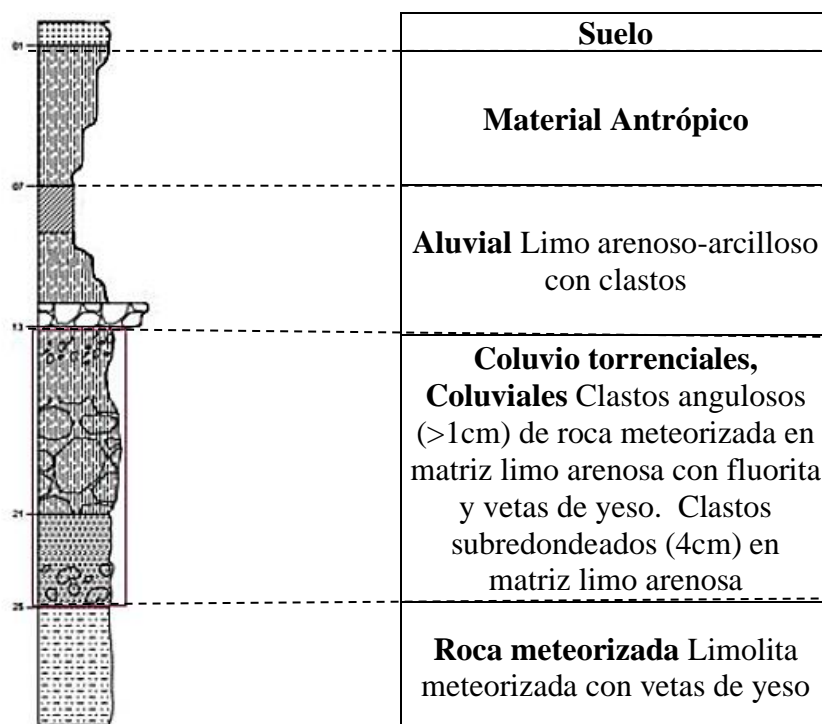


Figura 12. Depósito coluvio-torrenciales en sondeo 11(Enríquez Iturralde, 2018)

A continuación, en la tabla 11, las características mecánicas de cada estrato.

Tabla 11. Unidades y parámetros geotécnicos (Enríquez Iturralde, 2018)

Unidad	Cohesión (kPa)	Ángulo de Fricción (°)	γ seco (kN/m ³)	γ aparente (kN/m ³)	γ saturado (kN/m ³)	Grado de saturación (%)
Coluvios	15	10	12	17.21	17.59	93
Coluvios torrenciales	25	15	11	16.75	16.91	97
Relleno	40	18	11.5	15.82	16.97	80
Aluvial, fluvio mario	55	26	12	17.02	17.34	92

Roca blanda	100	28	15	20.77	21.07	92
-------------	-----	----	----	-------	-------	----

4.4 Resistencia geotécnica.

Según Vesic (1967), el fallo por punzonamiento ocurre únicamente en cimentaciones profundas cuando la relación entre la profundidad y la anchura, representada por L/d (donde L es la longitud del pilote y d es el diámetro o anchura del pilote), excede el valor de 4. La carga total de fallo $\overline{Q_u}$ puede expresarse de la siguiente manera. (V. N. S. Murthy, s. f.)

$$\overline{Q_u} = Q_u + W_p = Q_b + Q_f + W_p \quad (2)$$

Donde: Q_u = Capacidad ultima aplicada al pilote

Q_b = Resistencia en punta del pilote

Q_f = Resistencia en fricción del pilote

W_p = Peso del Pilote

4.4.1 Resistencia en punta en suelos cohesivos

De acuerdo con el método de Vesic (1977), en arcilla saturada (condición de $\Phi = 0$), la capacidad de carga última neta de un pilote se puede aproximar como:

$$Q_p = A_p q_p = A_p c_u N_c^* \quad (3)$$

Donde,

c_u = Cohesión no drenada

De acuerdo con la teoría de expansión de cavidad de Vesic:

$$N_c^* = \frac{4}{3}(\ln(I_{rr}) + 1) + \frac{\pi}{2} + 1 \quad (4)$$

4.4.2 Resistencia por fricción en suelos cohesivos (método λ):

El método propuesto por Vijayvergiya y Focht (1972) se fundamenta en la suposición de que el desplazamiento del suelo causado por la instalación del pilote genera una presión lateral pasiva en cualquier profundidad. Además, se asume que la resistencia superficial unitaria promedio es constante a lo largo del pilote. En este enfoque, se considera que la resistencia por punta y la resistencia por fricción lateral se desarrollan simultáneamente durante el proceso de hincado del pilote en el suelo. (Braja M. Das & Nagaratman Sivakugan, 2019)

$$Q_s = pL f_{prom} \quad (5)$$

$$f_{prom} = \lambda(\overline{\sigma'_o} + 2c_u) \quad (6)$$

Donde: $\overline{\sigma'_o}$ = Esfuerzo vertical efectivo medio para toda la longitud de empotramiento.

c_u = Resistencia cortante no drenada media ($\Phi = 0$).

p = Perímetro de la sección del pilote.

L = Longitud total del pilote.

Tabla 12. Valores de λ en función de L (m) (Braja M. Das & Nagaratman Sivakugan, 2019)

Longitud de empotramiento, L (m)	λ
0	0.5
5	0.336
10	0.245
15	0.200
20	0.173

25	0.150
30	0.136
35	0.132
40	0.127
50	0.118
60	0.113
70	0.110
80	0.110
90	0.110

4.4.3 Resistencia en punta en suelos arenosos.

En el método Nordlund/Thurman en suelos sin cohesión, el esfuerzo efectivo debe aplicarse sólo en arenas y limos no plásticos. La resistencia lateral unitaria nominal, Q_s , para este método, en ksf, se tomará como.

$$Q_p = \alpha_t N'_q A_p \sigma'_p \quad (7)$$

Donde:

α_t = Factor adimensional (Dependiente de la relación Profundidad – Ancho)

N'_q = Factor de capacidad portante.

A_p = Area de la sección de la punta del pilote (en ft²).

σ'_p = Presión geostática al nivel de la punta del pilote (en ksf).

4.4.4 Resistencia a fricción para suelos arenosos.

La ecuación del método Nordlund para calcular la resistencia nominal de un pilote es la siguiente:

$$Q_s = \sum K_\delta C_F \sigma'_d \sin(\delta) C_d \Delta d \quad (8)$$

Donde,

K_δ = Coeficiente de presión lateral de suelo a la profundidad d.

C_F = Factor de corrección para K_d cuando $\delta \neq \phi$.

σ'_d = Esfuerzo vertical efectivo en el centro del incremento de profundidad d.

δ = Ángulo de fricción entre el suelo y el pilote.

C_d = Perímetro del pilote a la profundidad d (en ft).

Δd = Longitud del segmento del pilote.

4.4.3 Resultados

4.4.3.1 Perfil estratigráfico del suelo cohesivo de Guayaquil

Se calculó en primera instancia la presión geo-estática de cada estrato como se muestra en la figura 11. Basado en la tesis de Vargas y Ulloa. (Vargas Celi & Ulloa Lamán, 2015)

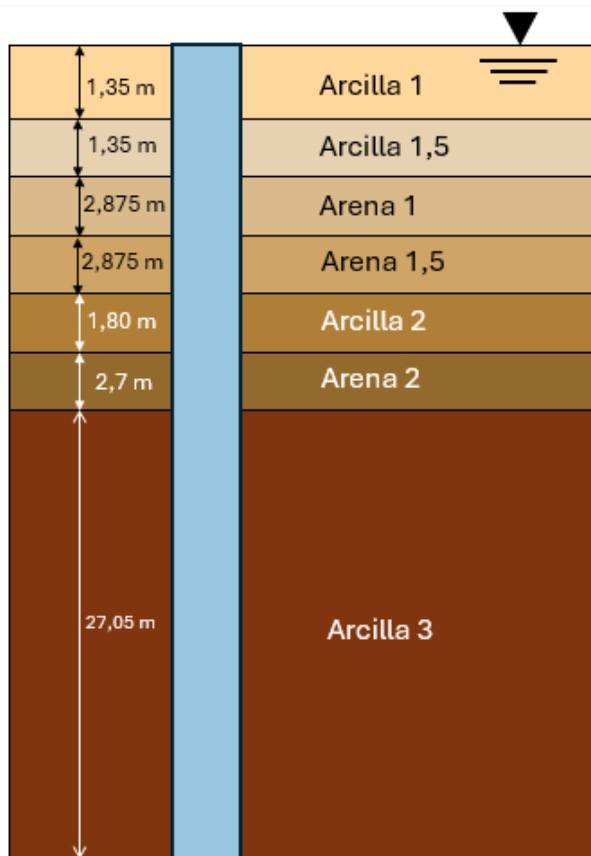


Figura 13. Perfil Estratigráfico (Suelo cohesivo)

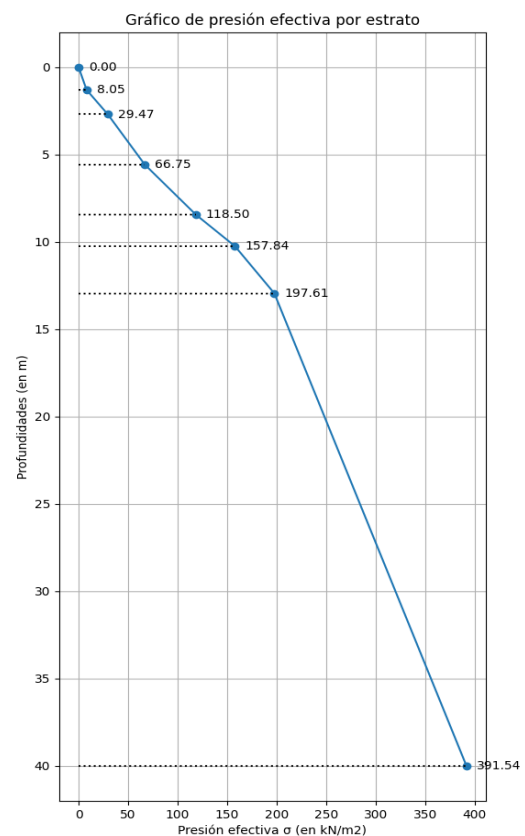


Figura 14. Gráfico de presión geo-estática por estrato

Considerando los datos de entrada a continuación, se realizó el cálculo de la resistencia en punta por el método de Vesic para arcillas saturadas.

$$A_p = 0.25 \text{ m}^2 \text{ (Área de la sección del pilote)}$$

$$c_u = 15 \text{ kN/m}^2 \text{ (Cohesión no drenada del estrato en la punta del pilote)}$$

$$p_a = 100 \text{ kN/m}^2 \text{ (Presión atmosférica)}$$

El valor de I_r implicado en la ecuación (4) es:

$$I_r = 347 \frac{c_u}{p_a} - 33 \leq 300 \quad (9)$$

La resistencia en punta Q_p por Vesic es = 29.153 kN

Se realizó igualmente una comparación con el método de Meyerhoff, donde:

$$Q_p \approx N_c^* c_u A_p = 9 c_u A_p \quad (10)$$

La resistencia en punta Q_p por Meyerhoff es = 33.493 kN

La resistencia en punta Q_p en promedio es = 31.323 kN = 3.193 Tonf

Considerando los datos de entrada presentes en la figura 4 y los datos a continuación, se realizó el cálculo de la resistencia de fricción por el método λ :

$$\lambda = 0.127; \quad L = 40 \text{ m}; \quad p = 2.61 \text{ m}$$

$$\overline{\sigma'_0} = \frac{1}{L} \int_0^L \sigma'_0 dz \quad (11)$$

$$c_u = \frac{1}{L} \sum c_{u(i)} \Delta L_i \quad (12)$$

$$\overline{\sigma'_0} = 228.323 \text{ kN/m}^2; \quad c_u = 13.923 \text{ kN/m}^2; \quad f_{\text{prom}} = 32.533 \text{ kN/m}^2$$

La fuerza total de fricción $Q_s = 3402.509 \text{ kN} = 346.841 \text{ Tonf}$

Se desprecia el peso del pilote al no tratarse de un valor significativo

Por lo tanto, siendo: $\overline{Q_u} = Q_u + W_p = Q_p + Q_f + W_p$

$$\overline{Q_u} = 3.193 \text{ Tonf} + 346.810 \text{ Tonf} = 350.033 \text{ Tonf}$$

4.4.3.2 Perfil estratigráfico del suelo moderadamente competente de Portoviejo

Se calculó en segunda instancia la presión geo-estática de cada estrato como se muestra en la figura 14. Basado en la tesis de Enríquez Iturralde. (Enríquez Iturralde, 2018)

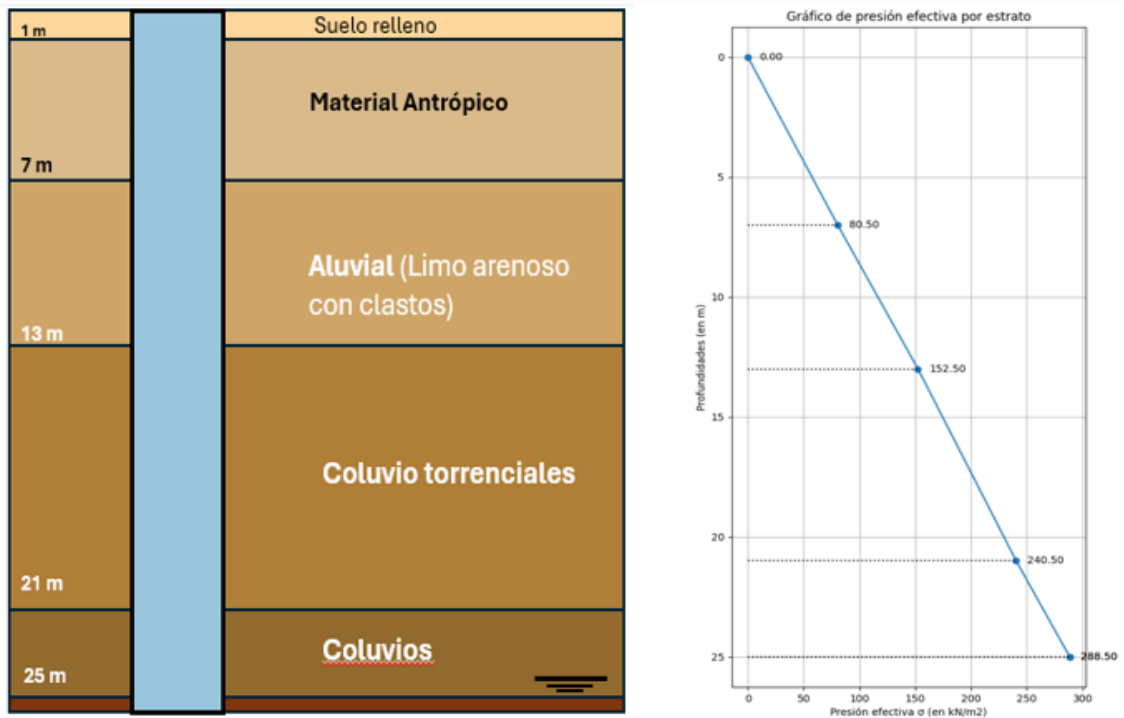


Figura 15. Graficas estratigrafía y presión geostática (Suelo Portoviejo)

De acuerdo con el método Nordlund/Thurman,

$$Q_p = \alpha_t N'_q A_p \sigma'_p \quad (13)$$

$$Q_s = \sum K_\delta C_F \sigma'_d \sin(\delta) C_d \Delta d \quad (14)$$

Basándose en el predimensionamiento realizado en el suelo cohesivo, se obtuvieron los valores de cada uno de los coeficientes adimensionales dependientes de las dimensiones de la sección, para más detalles remitirse al Anexo 3.

Tenemos, múltiples valores de φ , K_d , C_F , α_t y N_q para cada uno de los estratos.

$$\varphi = 18, 26, 15, 10, 28 \text{ grados}$$

$$K_d = 0.48, 0.96, 0.3, 0.1, 1.1$$

$$C_f = 0.98, 0.96, 0.99, 1, 0.94$$

$$\alpha_t = 0.195, 0.375, 0.14, 0.1, 0.46$$

$$N_q = 7.14, 25.49, 4.63, 2.41, 36.39$$

$$\delta = 18.502, 26.725, 15.418, 10.279, 28.781$$

El volumen por cada pie cúbico: $V = 2.439 \text{ ft}^3/\text{ft}$

Para el caso de este estrato, se calculó la resistencia en punta y fricción utilizando las mismas propiedades de la sección que el pilote utilizado para el estrato cohesivo, pero únicamente fue requerido un pilote de longitud 25 m para proveer la resistencia ante la carga de 350 Tonf.

La resistencia en punta del pilote $Q_p = 196.42 \text{ Tonf}$.

La resistencia en fricción del pilote $Q_s = 154.09 \text{ Tonf}$.

La demanda total $P_u = 350 \text{ Tonf}$

La resistencia total $Q_u = 350.51$ Tonf.

4.5 Modelación matemática del pilote hincado

4.5.1 Ecuación de onda

El análisis de la ecuación de onda es ahora el método estándar para predecir la maniobrabilidad en previsión de la conducción de pilotes. Esta ecuación se utiliza para describir cómo se transmiten las ondas de estrés en una varilla larga cuando se aplica una fuerza en un extremo de la varilla. La idea de aplicar la ecuación de onda a la conducción de pilotes surgió por primera vez del ingeniero civil australiano David Victor Isaacs en 1931. Aunque él y otros en la década de 1930 básicamente establecieron la teoría y la mayoría de su uso potencial, la teoría detrás de la ecuación de onda no se implementó entonces porque las ecuaciones involucradas en los cálculos eran demasiado difíciles debido a complicaciones derivadas de las acciones del martillo, el amortiguador del martillo, el pilote y el suelo. La propagación de onda unidimensional en un pilote se determina por medio de la siguiente ecuación diferencial parcial de equilibrio:

$$\frac{\partial^2 D}{\partial t^2} = c^2 \frac{\partial^2 D}{\partial x^2} \quad (15)$$

Siendo c la constante correspondiente a la velocidad de propagación de onda en el sólido la cual equivale a, $c = \sqrt{\frac{E}{\rho}}$, con ρ siendo la densidad del sólido y E su módulo de elasticidad, constante a lo largo del pilote. $D(x, t)$, la función de la deformación unitaria en función de la posición x en el pilote y el tiempo t ,

El desarrollo de computadoras digitales de alta velocidad permitió aplicar la ecuación de onda a problemas prácticos de conducción de pilotes. E.A.L. Smith, quien utilizó una solución numérica para investigar los efectos de factores como el peso del martillo, la velocidad del martillo, las propiedades del amortiguador y el pilote, y el comportamiento dinámico del suelo durante la conducción, despertó un interés generalizado en el método en 1960. Desde entonces, se ha completado una considerable investigación y se han correlacionado numerosas pruebas de pilotes a escala real que ahora permiten que el juicio de ingeniería se combine con la precisión matemática de la ecuación de onda. En general, la solución informática se utiliza para obtener la siguiente información para un solo golpe del martillo:

1. Predecir los esfuerzos de conducción inducidos en el pilote.
2. Determinar el movimiento resultante del pilote durante el impacto.
3. Determinar la resistencia a la penetración proporcionada por el suelo en el momento de la conducción.
4. Estimar la energía transferida entregada a la parte superior del pilote.

Smith desarrolló una metodología novedosa para integrar la ecuación de onda utilizando diferencias finitas. Su enfoque modelaba el pilote como una serie de pesos conectados por resortes, con el martillo y el amortiguador representados como un peso y resorte adicionales en un extremo. Se agregaron resistencias a los pesos para simular la fricción del fuste y la resistencia de la base como se muestra en la figura 16. (Pile Buck, 2006)

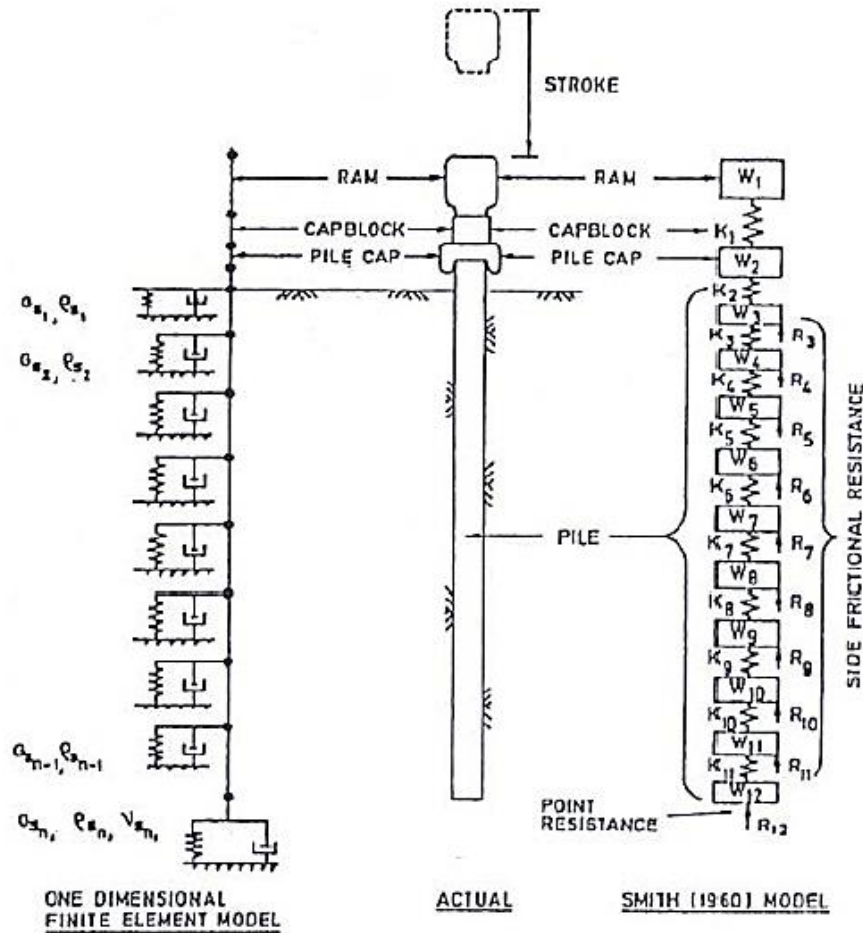


Figura 16. Modelo de la ecuación de onda. (Lee et al., 1988)

Las ecuaciones fundamentales que rigen el movimiento y las fuerzas en este sistema de pesos y resortes interconectados se derivan para el caso general de un peso W_m .

$$D_m = d_m + v_m \Delta t \quad (16)$$

$$C_m = D_m - D_{(m+1)} \quad (17)$$

$$F_m = C_m K_m \quad (18)$$

$$Z_m = F_{(m-1)} - F_m - R_m \quad (19)$$

$$V_m = v_m + \frac{Z_m g \Delta t}{W_m} \quad (20)$$

La resistencia total del suelo sobre el pilote se obtiene sumando las fuerzas resistentes que actúan en cada segmento del pilote, incluyendo la punta. El comportamiento resistente del suelo se modela mediante un diagrama fuerza-desplazamiento que consta de una fase elástica inicial (Q) seguida de una fase plástica (S). Al retirar la carga, el suelo recupera su deformación elástica inicial, pero conserva un desplazamiento permanente (S). Este modelo permite representar la interacción suelo-pilote durante la carga y descarga.

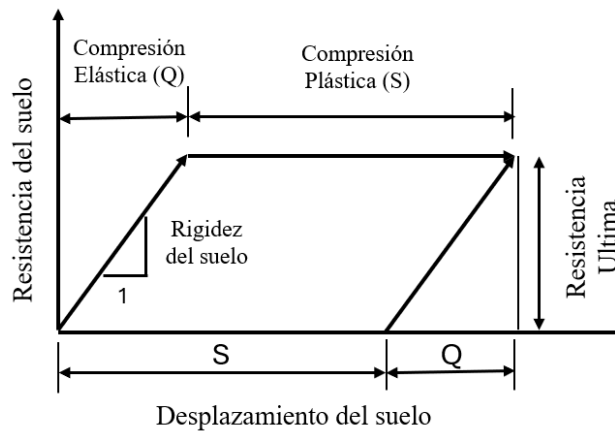


Figura 17. Relación resistencia-desplazamiento del suelo utilizada en el análisis de la ecuación de ondas (Paul W. Forehand & Joseph L. Reese, 1963a)

Para incluir el amortiguamiento viscoso, debe incluirse una constante de amortiguamiento J o J' multiplicada por la velocidad. La fuerza de amortiguamiento resultante actúa junto al pilote, entonces:

$$R_m = (D_m - D'_m)K'_m(1 + J'v_m) \quad (21)$$

$$D'_m = D_m - Q \quad (22)$$

Donde:

C_m = Compresión del resorte en el intervalo de tiempo n para la masa m .

c_m = Compresión del resorte en el intervalo de tiempo $(n - 1)$

D_m = Desplazamiento de la masa m en el intervalo de tiempo n

D'_m = Desplazamiento permanente de la masa m (Por encima del rango elástico).

d_m = Desplazamiento en el intervalo de tiempo $(n - 1)$ de la masa m .

F_m = Fuerza ejercida por el resorte en el intervalo de tiempo n por la masa m .

K_m = Rigidez del resorte correspondiente al tramo m del pilote.

K'_m = Rigidez del resorte correspondiente al suelo

J' = Constante de amortiguamiento correspondientes a la resistencia en fricción del suelo.

J = Constante de amortiguamiento correspondiente a la punta del pilote.

Δt = Intervalo infinitesimal de tiempo en segundos (Varía según material).

V_m = Velocidad de la masa m en el intervalo de tiempo n .

v_m = Velocidad de la masa m en el intervalo de tiempo $(n - 1)$

W_m = Peso de una masa m .

Z_m = Fuerza producida por Aceleración de la masa m en el intervalo n .

g = Aceleración de la gravedad

Q = Coeficiente de desplazamiento permanente del suelo

R_m = Resistencia de la masa m en el intervalo de tiempo n

R_u = Resistencia total máxima del terreno al hincado.

R_{um} = Porción de R_u aplicable a la masa m .

Para iniciar los cálculos numéricos, es necesario conocer la velocidad del ariete (o martillo) en el preciso instante del impacto. Normalmente, el fabricante proporciona la energía máxima nominal del martillo en unidades de pie-libra. Sin embargo, el rendimiento real del ariete, que es la relación entre la energía cinética en el impacto y la energía máxima nominal, no siempre es especificado por el fabricante. En tales casos, se suele asumir un valor típico de rendimiento. Por conveniencia práctica, en estos cálculos se adoptará un rendimiento constante de 0.8 para todos los martillos. Con los datos proporcionados por el fabricante y asumiendo este valor de rendimiento, es posible calcular la velocidad de impacto del ariete utilizando una fórmula siguiente basada en el principio de la energía mecánica de un cuerpo:

$$V_{\text{impacto}} = \frac{\sqrt{\text{Energía} * \text{eficiencia} * g * h_{\text{golpe}}}}{W_{\text{martillo}}} \quad (23)$$

4.5.2 Condiciones para el hincado del pilote

4.5.2.1 Parámetros del modelo

De acuerdo con la AASHTO si se utiliza un análisis de la ecuación de onda para la determinación de la resistencia de carga nominal, entonces el criterio de hinca (conteo de golpes) puede ser el valor tomado al final de la hinca.

En función las recomendaciones proporcionadas por Smith en su postulado, para suelos arcillosos se sugieren utilizar los siguientes parámetros numéricos.

Tabla 13. Coeficientes de amortiguamiento, lapso y coeficientes de desplazamiento permanente (Paul W. Forehand & Joseph L. Reese, 1963a)

Material	Δt	Q (Suelo medianamente competente)	Q (Suelo arcilloso saturado)	J' (Suelo Medianamente competente)	J' (Suelo arcilloso Saturado)	J (Suelo medianamente competente)	J (Suelo Arcilloso Saturado)
Hormigón	0.00033	0.00254	0.00508	0.12	0.20	0.12	0.15
Acero	0.00025	0.00254	0.00508	0.12	0.20	0.12	0.15

Los valores de Q, J' y J son propuestos por Smith obtenidos por medio de múltiples ensayos y estudios estadísticos. Se tomará una eficiencia de 0.8 para cada uno de los casos.

Por otro lado, para el modelamiento se emplearon distintos coeficientes de rigidez tanto en punta (K'_p) como para cada segmento discretizado (K'_m) para cada tipo de suelo, así como aquel correspondiente a la protección (K'_1) en kgf/m:

Tabla 14. Coeficientes de rigidez empleados en el modelo

	K'_m	K'_p	K'_1
Suelo medianamente competente	2426607.56	77331400.67	19581692.91
Suelo Arcilloso	1706894.08	628536.69	19581692.91

4.5.2.2 Martillos utilizados para el modelo

Es necesario realizar una comparación de múltiples procesos de hincado con diferentes martillos para conocer con precisión qué ventajas el uso del HUAP puede tener frente a pilotes fabricados con otros materiales. Los martillos utilizados para el análisis se presentan en la tabla 10:

Tabla 15. Datos técnicos de cada martillo analizado. (Voort et al., 2008)

Maquinaria	Peso del martillo (en Tonf)	Altura máxima de recorrido (en m)	Energía máxima de golpe (en kJ)	Rango de peso permitido del pilote (en Tonf)
D8 - 22	0.795	3.48	27.30	0.50 – 3.00
D19 – 42	1.814	3.30	58.60	1.10 – 6.00
D36 – 32	3.597	3.48	122.80	2.50 – 12.00
D100 - 13	10.001	3.67	360.20	7.00 – 100.00

4.5.2.3 Parámetros límites permitidos

De acuerdo con las especificaciones de la AASHTO 2017 artículo 10.7.8, los esfuerzos máximos producidos durante el hincado del pilote determinados en el análisis, en cualquier parte del elemento, no pueden sobrepasar el esfuerzo σ_{dr} :

$$\sigma_{dr} = 0.9\phi_{da}f_y \quad (24)$$

En pilotes de acero tanto a compresión como a tensión.

$$\sigma_{dr} = \phi_{da}0.85f'_c \quad (25)$$

En pilotes de hormigón a compresión.

$$\sigma_{dr} = 0.7\phi_{da}f_y \quad (26)$$

En pilotes de hormigón a tensión.

Donde: f_y = Esfuerzo de fluencia del acero

ϕ_{da} = Factor de seguridad (= 1 En acero ; = 1 En hormigón)

f'_c = Esfuerzo a compresión del hormigón

(American Association of State Highway and Transportation Officials, 2017)

4.5.3 Resultados:

Debido a las limitantes enfrentadas para la realización del trabajo, no fue posible realizar el análisis por medio de cualquiera de los programas disponibles para el estudio de pilotes hincados. Para este proceso analítico es necesario emplear GRLWEAP el cual es un programa de análisis de ecuación de onda unidimensional que simula la respuesta del pilote al equipo de conducción del pilote. Sin embargo, basándose en el proceso numérico propuesto por Smith, se obtuvieron las respectivas curvas de desplazamientos, velocidades y resistencias para cada una de las masas en la fracción de tiempo requerida para que se produzca el desplazamiento permanente del pilote por cada golpe. El proceso de cómputo se realizó con una rutina de Python, dándonos resultados apreciables en la figura 18, para más detalles remitirse al Anexo 1 y 2.

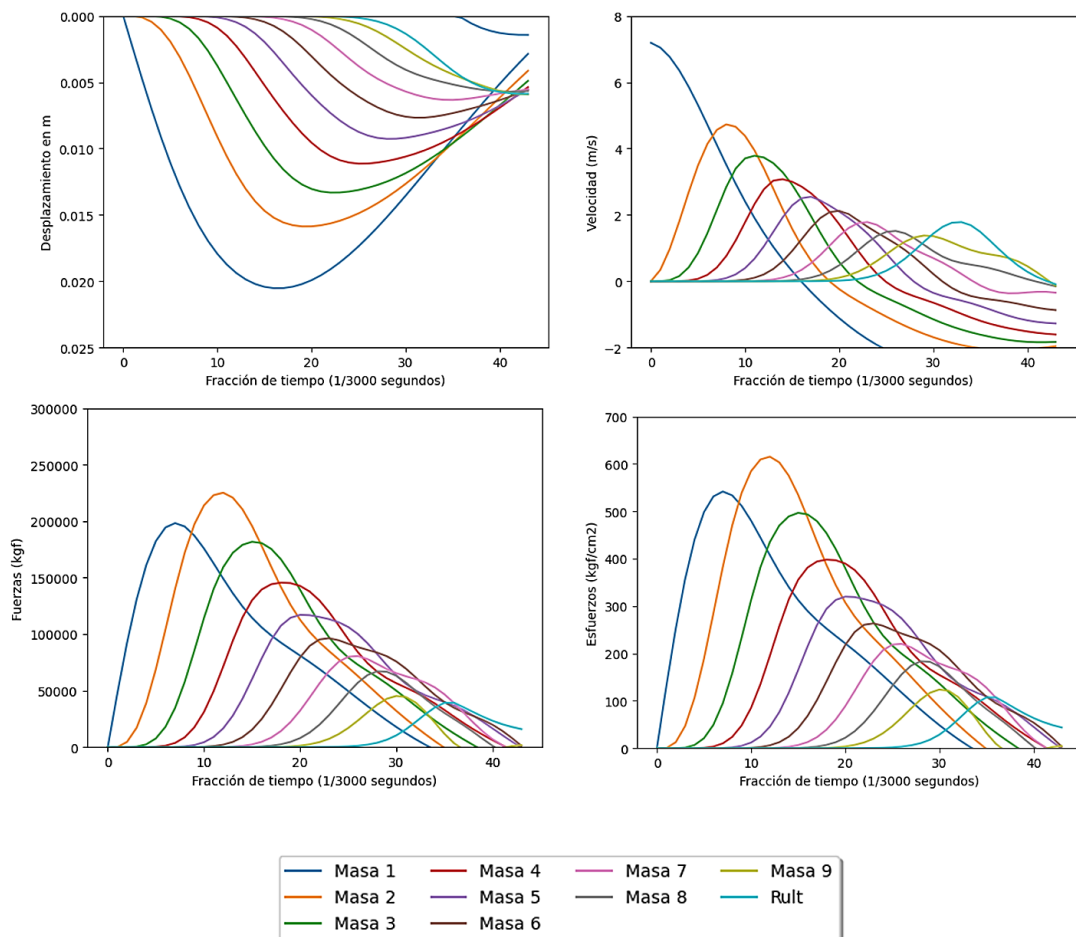


Figura 18. Desplazamientos, velocidades, resistencias producidas por cada una de las masas al ser atravesados por la onda.

Tras resolver la ecuación de onda para ambos suelos y los martillos especificados, empleando este método, se obtuvieron los resultados mostrados en las tablas 15 y 16:

Tabla 16. Resultados en Suelo medianamente competente de Portoviejo (en kgf/cm^2).

Resultados en Suelo medianamente competente de Portoviejo (en kgf/cm^2)						
Hormigón Simple + cojín						
Martillo	σ_c	σ_{drc}	% σ_c/σ_{drc}	σ_t	σ_{drt}	% σ_t/σ_{drt}
D8 - 22	110.17	204	54.00%	81.04	2940	2.76%
D19 - 42	151.26	204	74.14%	100.25	2940	3.41%
D36 - 32	191.19	204	93.72%	216.68	2940	7.37%
D100 - 13	270.76	204	132.73%	91.31	2940	3.11%
Hormigón de Alta resistencia ($f'c = 700 kgf/cm^2$)						
Martillo	σ_c	σ_{drc}	% σ_c/σ_{drc}	σ_t	σ_{drt}	% σ_t/σ_{drt}
D8 - 22	301.62	595	51%	144.25	2940	5%
D19 - 42	412.88	595	69%	77.36	2940	3%
D36 - 32	504.82	595	85%	385.24	2940	13%
D100 - 13	616.37	595	104%	415.21	2940	14%
Hormigón de Ultra altas prestaciones						
Martillo	σ_c	σ_{drc}	% σ_c/σ_{drc}	σ_t	σ_{drt}	% σ_t/σ_{drt}
D8 - 22	366.56	1241	29.54%	184.69	2294.10	8.05%
D19 - 42	484.03	1241	39.00%	93.20	2294.10	4.06%
D36 - 32	606.54	1241	48.88%	449.75	2294.10	19.60%
D100 - 13	731.64	1241	58.96%	478.81	2294.10	20.87%
Acero estructural A36						
Martillo	σ_c	σ_{drc}	% σ_c/σ_{drc}	σ_t	σ_{drt}	% σ_t/σ_{drt}
D8 - 22	1480.42	2294.10	64.53%	949.46	2294.10	41.39%
D19 - 42	1862.00	2294.10	81.16%	1122.12	2294.10	48.91%
D36 - 32	2226.14	2294.10	97.04%	1481.39	2294.10	64.57%
D100 - 13	2566.73	2294.10	111.88%	1588.22	2294.10	69.23%

Tabla 17. Resultados en Suelo Arcilloso en Guayaquil (en kgf/cm^2)

Resultados en Suelo Arcilloso en Guayaquil (en kgf/cm^2)						
Hormigón Simple + cojín						
Martillo	σ_c	σ_{drc}	$\% \sigma_c/\sigma_{drc}$	σ_t	σ_{drt}	$\% \sigma_t/\sigma_{drt}$
D8 - 22	132.41	204	64.91%	82.11	2940	2.79%
D19 - 42	166.52	204	81.63%	69.21	2940	2.35%
D36 - 32	223.64	204	109.63%	126.15	2940	4.29%
D100 - 13	307.79	204	150.88%	41.05	2940	1.40%
Hormigón de Alta resistencia ($f'_c = 700 \text{ kgf}/\text{cm}^2$)						
Martillo	σ_c	σ_{drc}	$\% \sigma_c/\sigma_{drc}$	σ_t	σ_{drt}	$\% \sigma_t/\sigma_{drt}$
D8 - 22	416.23	595	70%	168.37	2940	6%
D19 - 42	491.17	595	83%	59.38	2940	2%
D36 - 32	565.04	595	95%	345.35	2940	12%
D100 - 13	634.35	595	107%	120.08	2940	4%
Hormigón de Ultra altas prestaciones						
Martillo	σ_c	σ_{drc}	$\% \sigma_c/\sigma_{drc}$	σ_t	σ_{drt}	$\% \sigma_t/\sigma_{drt}$
D8 - 22	488.17	1241	39.34%	230.47	2294.10	10.05%
D19 - 42	473.50	1241	38.15%	224.15	2294.10	9.77%
D36 - 32	486.76	1241	39.22%	229.87	2294.10	10.02%
D100 - 13	499.74	1241	40.27%	235.43	2294.10	10.26%
Acero estructural A36						
Martillo	σ_c	σ_{drc}	$\% \sigma_c/\sigma_{drc}$	σ_t	σ_{drt}	$\% \sigma_t/\sigma_{drt}$
D8 - 22	1595.15	2294.10	69.53%	647.47	2294.10	28.22%
D19 - 42	2154.98	2294.10	93.94%	1118.97	2294.10	48.78%
D36 - 32	2379.57	2294.10	103.73%	1106.08	2294.10	48.21%
D100 - 13	2723.50	2294.10	118.72%	1222.81	2294.10	53.30%

Se consideró los valores de compresión máxima obtenidos como el pico máximo encontrado entre todas las curvas de esfuerzos. Por otro lado, para la tracción máxima se consideró la diferencia de esfuerzos máxima encontrada entre la curva de esfuerzos correspondiente a la tercera masa y la penúltima masa cuando estas poseyeron esfuerzos de signo opuesto. Se realizó por lo tanto una comparativa visualmente apreciable por medio de las siguientes gráficas.

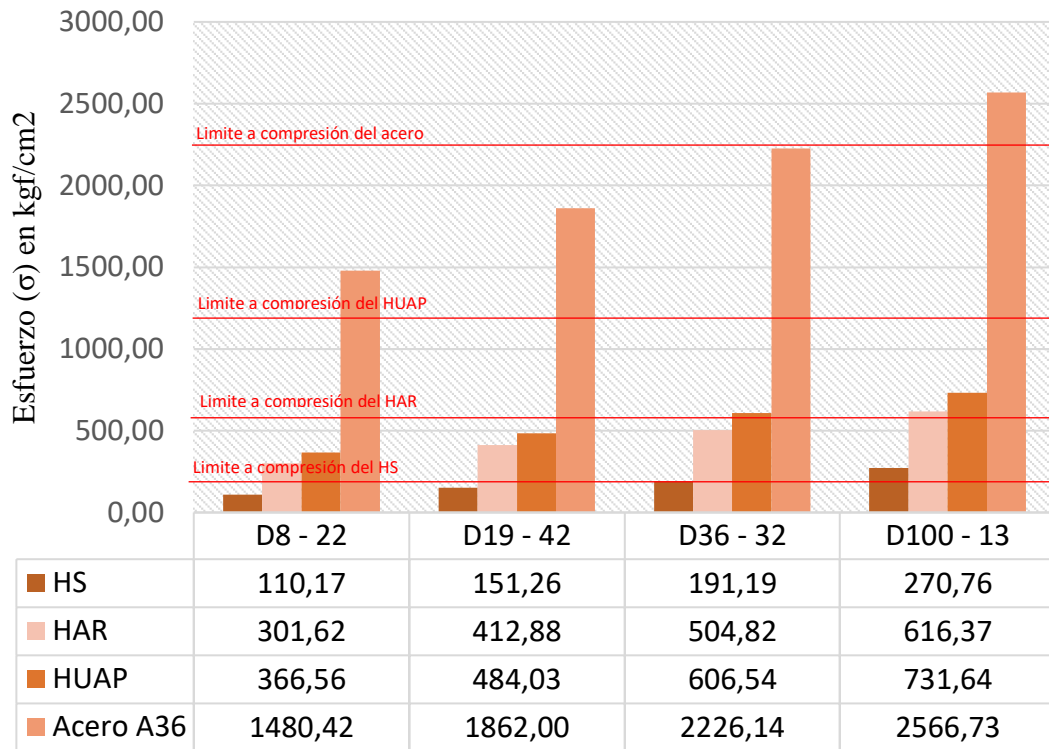


Figura 19. Esfuerzos de compresión en Suelo de Portoviejo con los 4 martillos

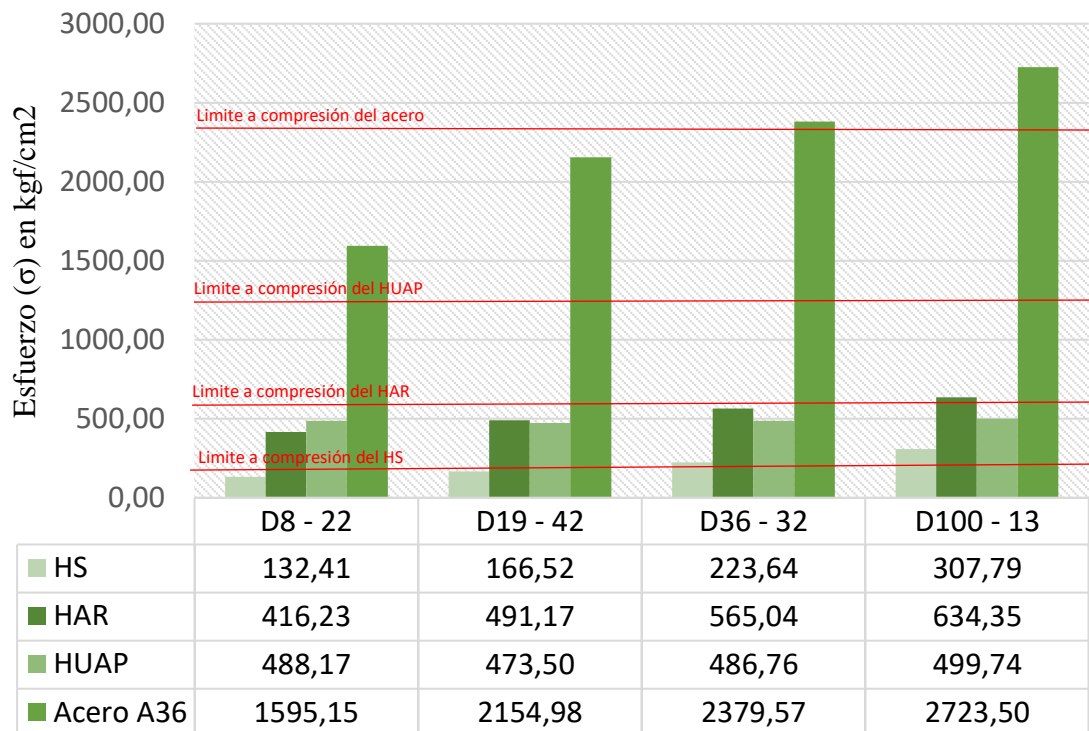


Figura 20. Esfuerzos de compresión en Suelo de Guayaquil con los 4 martillos

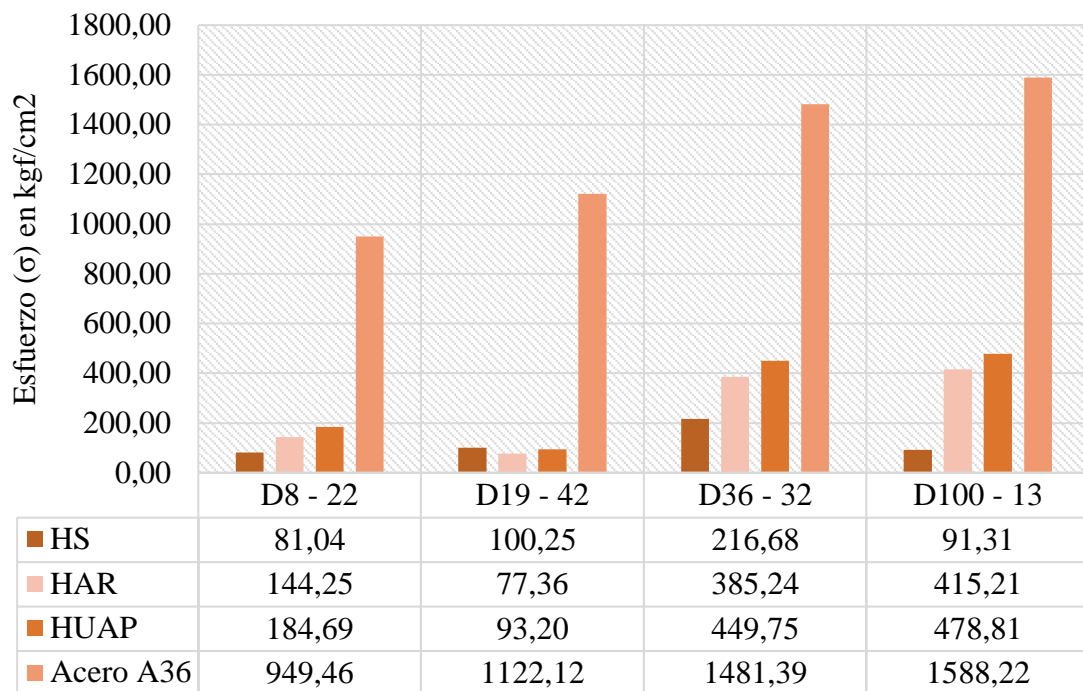


Figura 21. Esfuerzos de tracción en Suelo de Portoviejo con los 4 martillos

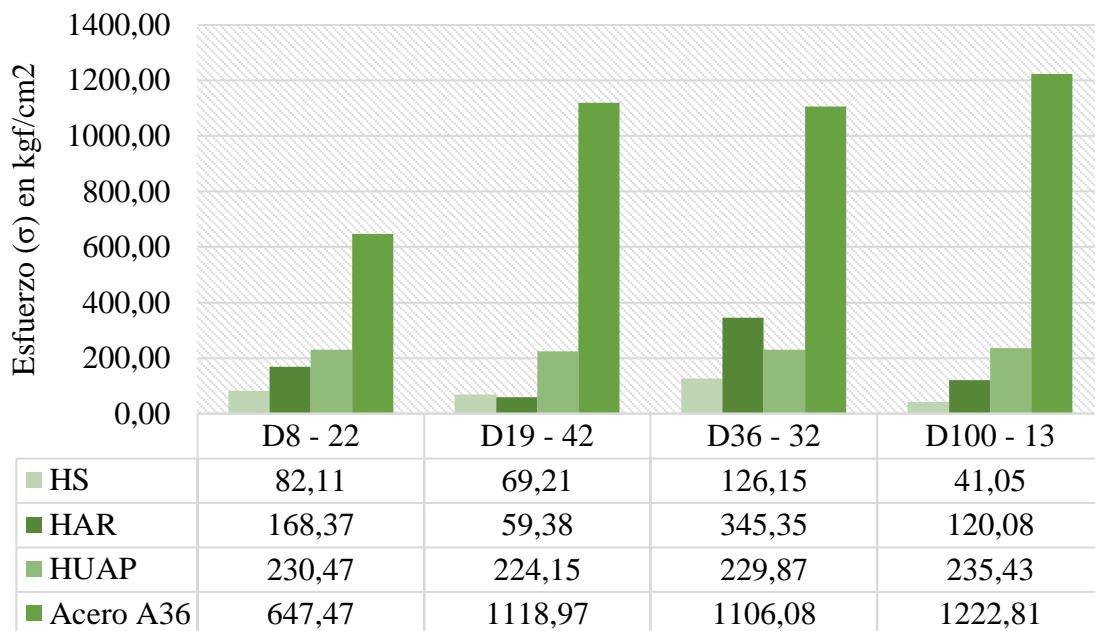


Figura 22. Esfuerzos de tracción en Suelo de Guayaquil con los 4 martillos

Podemos ver que el único pilote capaz de resistir la energía transferida por el impacto de cualquiera de los martillos, en cualquiera de los dos estratos, fue el pilote de hormigón de

ultra altas prestaciones. Se puede evidenciar por los resultados que el hormigón simple por sí sólo sufre esfuerzos que en el peor de los casos superan por 50.88 % la capacidad máxima permitida en el elemento. El pilote de acero por su lado al ser un elemento de mayor rigidez produce esfuerzos de compresión significativamente mayores en relación con los otros, esto siendo problemático puesto que en el peor de los casos sus esfuerzos superan por un 18.72% los esfuerzos máximos permitidos para el acero. La relación entre masa y rigidez del pilote de HUAP es ideal para propagar la energía de impacto del martillo sin comprometer la integridad estructural del pilote. Cabe mencionar que en ningún pilote los esfuerzos de tracción significaron un problema. Por último, podemos decir que otra alternativa viable para la construcción de pilotes de gran longitud es el uso de hormigones de altas resistencias; estos son igualmente capaces de resistir los esfuerzos con casi todos los martillos.

Es importante tomar en cuenta que los resultados obtenidos no realizan una comparación entre casos donde se emplee el uso de cojines de amortiguación, únicamente el pilote de hormigón simple se modeló con estas características. Los pilotes de HAR y de acero, si bien no pueden soportar por sí solos el impacto del martillo son capaces de transferir la energía de impacto sin problema si se emplea un cojín de amortiguación en el hincado. El pilote de HUAP mantiene una ventaja respecto al resto de pilotes al no necesitar de un cojín para su hincado, lo que facilita mucho los trabajos constructivos.

Para ejemplificarlo la significativa reducción de esfuerzo que se puede lograr con un cojín de amortiguamiento, podemos ver en la figura 23 la diferencia en los esfuerzos en el pilote con y sin cojín.

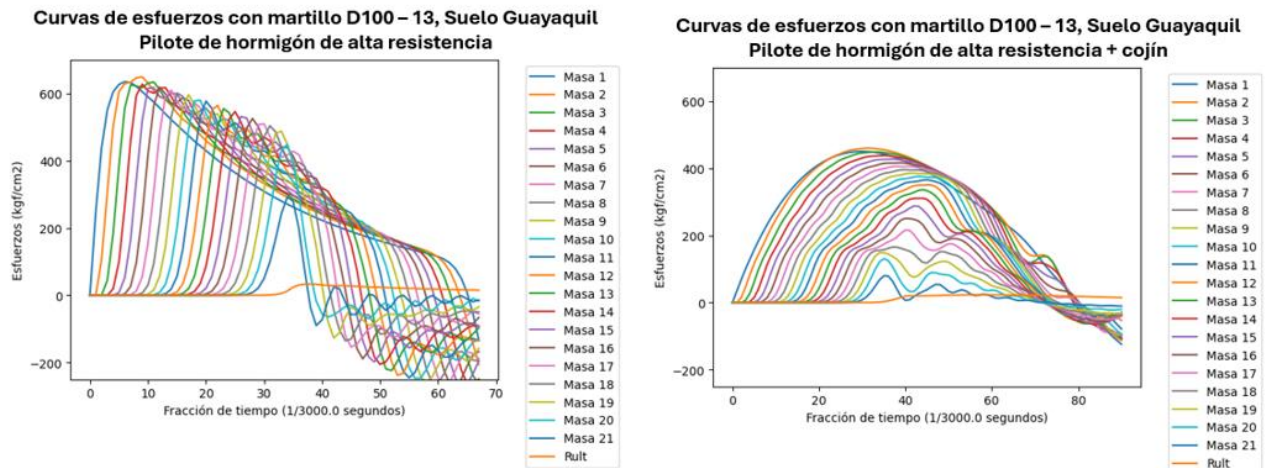


Figura 23. Comparativa de esfuerzos, pilote de HAR con y sin cojín.

En casos constructivos reales, la optativa más empleada hoy en día es el uso de hormigones de alta resistencia cuya resistencia a compresión esté entre los 400 y 700 kgf/cm^2 . Sin embargo, es muy importante tomar en cuenta que, en proyectos de gran albergadura, cuando se necesitan numerosos pilotes en la cimentación, el ahorro en tiempo es un factor vital para tomar en consideración durante la construcción de la cimentación. Tras haber realizado el análisis con distintos martillos, se calculó los desplazamientos máximos producidos por golpe con cada uno de los martillos, realizando una comparativa figura 23.

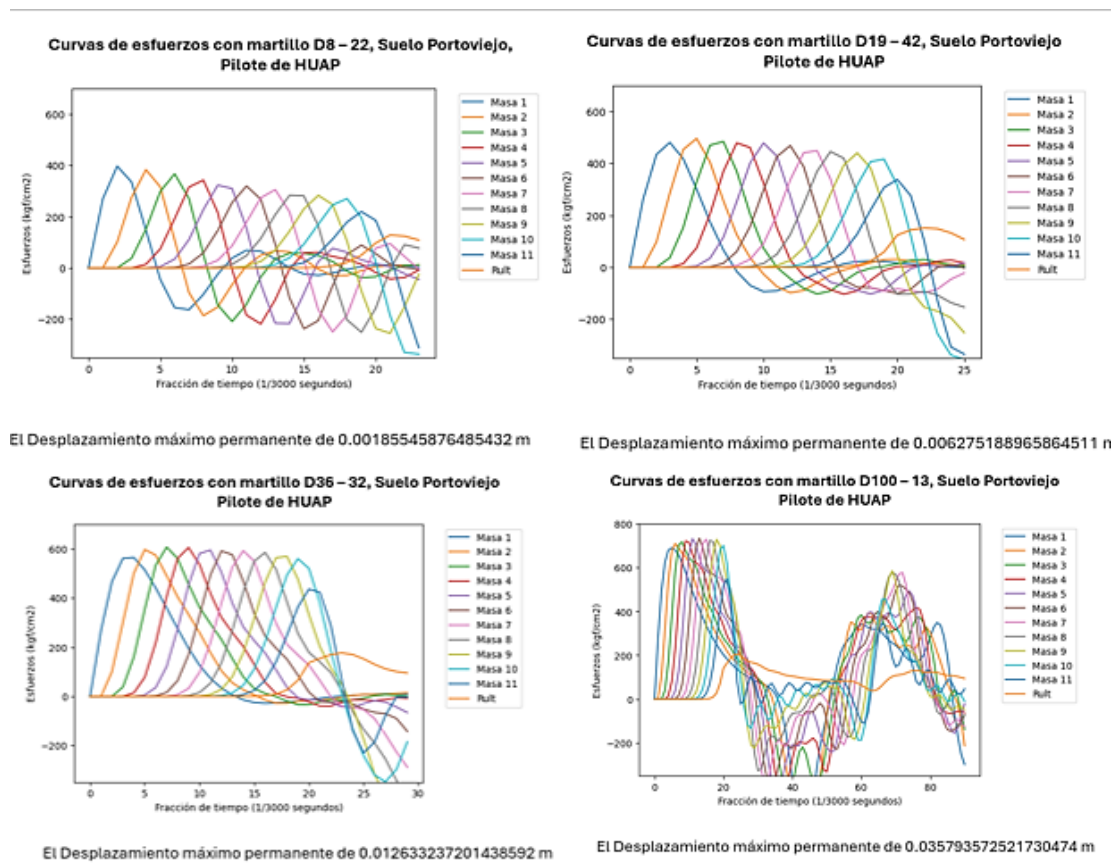


Figura 24. Comparativas de esfuerzos y desplazamientos entre martillos

Como se aprecia en la figura, al incrementarse el peso y la altura de caída del martillo, los esfuerzos internos en el pilote se incrementan considerablemente, así como el desplazamiento máximo permanente. Este desplazamiento máximo permanente es la profundidad que desciende el pilote para el golpe ejecutado a la profundidad modelada, la cual es la profundidad del pilote enterrado por completo. Podemos decir de acuerdo con estos resultados que, a mayor energía de impacto, mayor el desplazamiento y por lo tanto mayor velocidad de hincado durante el proceso constructivo.

Tabla 18. Comparativa de desplazamientos máximos permanentes.

Martillo	Desplazamiento máximo permanente (cm)
D8 - 22	0.2
D19 – 42	0.63
D36 - 22	1.3
D100 - 13	3.6

Esto último siendo clave durante el proceso constructivo de la cimentación puesto que representa un ahorro económico en la obra. El pilote de HUAP destaca por facilitar el hincado al no necesitar cojines de amortiguación y permitiendo el uso del martillo más pesado (D100-13).

Al seleccionar el material para los pilotes, es crucial considerar los efectos medioambientales. En ciertos entornos, el acero es susceptible a la corrosión, especialmente en instalaciones en alta mar, donde los pilotes pueden estar expuestos a la zona de salpicaduras. Para mitigar la corrosión, se suelen emplear dos métodos: utilizar acero más grueso para compensar la pérdida gradual de material con el tiempo, o implementar un sistema de protección catódica. Además, el ingeniero debe evaluar la desviación de los pilotes durante la instalación. Las puntas de los pilotes en un grupo pueden acercarse y tocarse a medida que se profundizan. La rigidez a la flexión de los pilotes en relación con la rigidez del suelo y la posición de la cabeza del pilote son factores que influyen en esta desviación. La proximidad de los pilotes después de su instalación puede o no afectar su capacidad de carga. Si la posición final de los pilotes es crítica, el ingeniero puede requerir la perforación previa. (Lymon C. Reese et al., 2006)

El uso de pilotes de Hormigón de Ultra Alta Resistencia (UHPC) presenta varias ventajas en comparación con los pilotes de acero o de otros tipos de hormigón. En términos de resistencia a la corrosión, los pilotes de UHPC no se ven afectados de la misma manera que el acero, eliminando la necesidad de utilizar materiales extra gruesos o de implementar sistemas de protección catódica, lo que simplifica el diseño y reduce los costos a largo plazo. Además, la mayor rigidez y resistencia a la flexión del UHPC reduce la desviación de los pilotes durante la instalación, mejorando la precisión y la estabilidad del grupo de pilotes. Esto resulta especialmente beneficioso cuando la posición final de los pilotes es crítica, ya

que disminuye la necesidad de perforación previa, optimizando así el proceso de instalación y asegurando una mayor capacidad de carga en estructuras exigentes.

4.5.4 Limitaciones del modelamiento.

El modelado matemático desarrollado por Smith en 1962 para resolver la ecuación de onda en pilotes hincados presenta limitaciones importantes, principalmente porque depende de soluciones numéricas que tienden a simplificar demasiado las condiciones en los extremos del pilote y la forma en que el suelo reacciona. Estas simplificaciones pueden llevar a resultados menos precisos y a una comprensión limitada de fenómenos complejos como la disipación de energía y la interacción entre el suelo y el pilote. Actualmente, existen métodos avanzados como el uso de fórmulas exactas para la ecuación de onda amortiguada, la transformada de Laplace, y las series de Fourier, además de modelos computacionales como los de elementos finitos (FEM) y elementos discretos (DEM). Estos métodos modernos permiten simular mejor las condiciones reales, la respuesta no lineal del suelo y la dinámica del impacto, lo que mejora la precisión y la confiabilidad en el análisis de pilotes hincados.

Las suposiciones y omisiones realizadas al crear las fórmulas prestan poca atención a las fuerzas y movimientos reales que ocurren durante la hincada de un pilote, ya que la naturaleza del suelo y el comportamiento del pilote son supuestas. Sin embargo, en la hincada de pilotes el propósito es reducir la fuerza en la cabeza a un valor que no dañe el pilote, por lo que es necesario considerar las fuerzas resistentes. (Paul W. Forehand & Joseph L. Reese, 1963).

Se puede encontrar más información sobre programas específicos de ecuaciones de onda en los respectivos manuales de usuario de los programas, como el manual de usuario de GRLWEAP.

5. Capítulo V: Demanda de HUAP en Ecuador.

5.1 Cimentaciones en edificios altos.

El Burj Khalifa, localizado en Dubái, Emiratos Árabes Unidos, es una de las obras de ingeniería más impresionantes del mundo. Con una altura de 828 metros y 162 pisos, es el edificio más alto del planeta. (Giroux, 2023)



Figura 25. Rascacielos Burj Khalifa

Fuente: www.burjkhalifa.ae



Figura 26 Sistema de fundación de balsa

Fuente: Xataka

Previo a su construcción se realizó un análisis del suelo en el sitio previsto para la construcción y se descubrió que los cimientos debían apoyarse sobre roca sedimentaria, la cual es menos estable en comparación con otros tipos de roca. Para evitar asentamientos la solución fue emplear una gigantesca base de hormigón conocida como “fundación de balsa” de 3,66 metros con una profundidad de 7,3 metros y una superficie de 7.432 metros cuadrados donde reposan las 500.000 toneladas del rascacielos. (Márquez, 2022)

Su cimentación, al tratarse de un suelo poco competente en donde su composición principal era la roca sedimentaria y estratos de suelo blando con capas de arenisca donde los estudios geotécnicos revelaron que el suelo tenía una capacidad de carga baja se decidió por distribuir las cargas a 192 pilotes de concreto de 1.5 metros de diámetro, los cuales se extienden hasta una profundidad de 50 metros. Esta cimentación profunda fue crucial para

soportar el colosal peso del edificio y mantener su estabilidad en un suelo con propiedades geotécnicas adversas. (Giroux, 2023)

En el ámbito de la ingeniería, el Burj Khalifa destaca no solo por su altura récord, sino también por las soluciones innovadoras empleadas en su construcción. Este rascacielos ha establecido nuevos estándares en diseño estructural, resistencia a las solicitaciones y técnicas de cimentación. Es un referente para futuros proyectos de mega estructuras, inspirando a ingenieros a ampliar los límites de lo posible en la construcción a gran altura.

Otro ejemplo destacado en ingeniería son Las Torres Petronas en Malasia, reconocidas por sus cimientos excepcionalmente profundos. Capital Piling, una firma británica especializada en pilotes y cimentaciones ha destacado estos edificios por tener los anclajes más profundos del mundo. (Prego, 2023)

Los cimientos de las Torres Petronas en Kuala Lumpur representan una proeza ingenieril, dada la naturaleza del suelo en el lugar de construcción. Con una altura impresionante de 452 metros, estas torres requerían una base extremadamente sólida para garantizar su estabilidad y seguridad. Según detalla la web Petronas Twin Towers, la compañía Bachy Soletanche se encargó de los trabajos de cimentación, dedicando aproximadamente 12 meses a esta tarea, logrando así cimientos que alcanzan los 120 metros de profundidad. (Prego, 2023)

El suelo en el área consistía principalmente en roca caliza y cavernas subterráneas, lo que presentaba un desafío significativo. Para asegurar una base estable, los ingenieros optaron por cimentaciones profundas con pilotes. Se utilizaron más de 100 pilotes de concreto reforzado, algunos de los cuales alcanzaron profundidades de hasta 120 metros. Estas dimensiones fueron necesarias para penetrar la roca caliza inconsistente y llegar a capas más estables del subsuelo. (CapitalPiling, 2024)

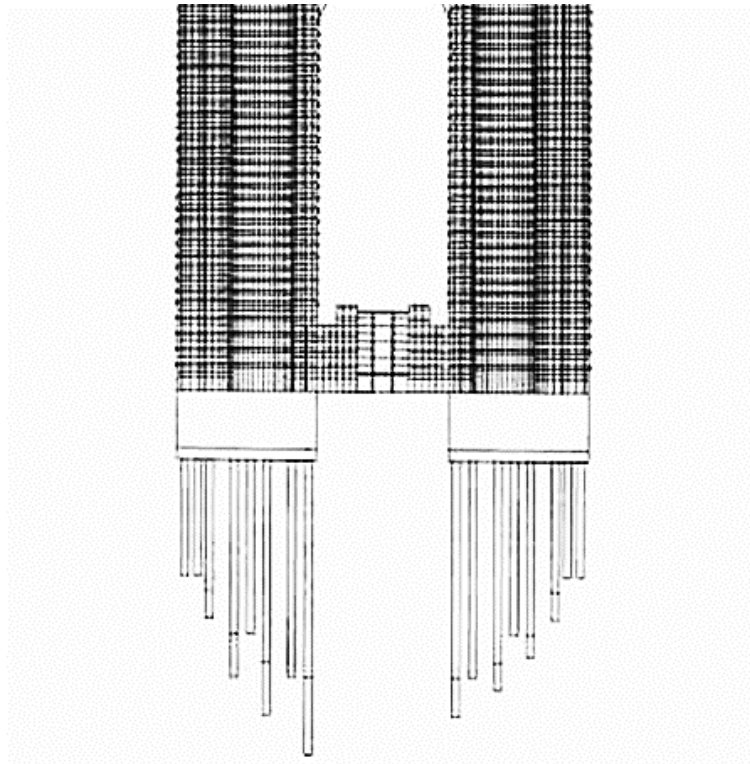


Figura 27. Cimentación de las Torres Petronas Fuente: WolkSoftware

La elección de estos pilotes profundos fue crucial para distribuir el enorme peso de las torres y minimizar el riesgo de asentamientos desiguales, garantizando así la integridad estructural a largo plazo de las Torres Petronas.

5.2 Aplicaciones del HUAP.

El Instituto Americano de Concreto (ACI) ha estado monitoreando de cerca los avances del Hormigón de Ultra Altas Prestaciones (HUAP) en el campo de la ingeniería. Ejemplos destacados de su aplicación son la construcción de puentes vehiculares y peatonales. La implementación del HUAP en lugar del hormigón convencional permite fabricar puentes con tramos más largos y espesores reducidos, además de aumentar la durabilidad de las estructuras. Asimismo, al contar con elementos con mayor resistencia a la

tracción, se reduce la cantidad de acero de refuerzo necesario, disminuyendo así la cantidad total.

Al ser una tecnología nueva en cuanto a materiales, el primer puente peatonal construido con Hormigón de Ultra Altas Prestaciones data de 1997 en Sherbrooke, Canadá. Este puente peatonal y carril bici tiene una longitud de 60 metros y cruza el río Magog, empleando una resistencia de 200 MPa en su concreto.

En términos de reducción de costos, destaca el puente peatonal Sakata-Mirai en Sakata, Japón. Este puente se extiende por 50,2 metros y está compuesto por seis dovelas prefabricadas. Su peso propio es aproximadamente un 80 por ciento menor que el de un puente similar construido con hormigón convencional, lo que resulta en una reducción de costos del 10 por ciento (Rebentrost y Cavil 2006).



Figura 28. Puente peatonal Sakata-Mirai

Recientes investigaciones han demostrado que el Hormigón de Ultra Altas Prestaciones (HUAP) también puede utilizarse para la rehabilitación sísmica de columnas. Massicotte (2013) propuso emplear HUAP con aplicaciones antisísmicas, combinándolo con barras de acero de refuerzo para elaborar camisas en elementos estructurales. Esta técnica mejora el comportamiento de las derivas y reduce los desplazamientos causados por la

licuefacción, un fenómeno geotécnico en el cual un suelo saturado de agua pierde temporalmente su rigidez y resistencia debido a una tensión, como la generada por un terremoto o una vibración intensa.

Un ejemplo de esta aplicación se encuentra en el puente Mission, ubicado en Canadá. Según Kennedy, el encamisado de pilares con HUAP fue una solución sencilla en comparación con los métodos tradicionales que emplean acero u hormigón, los cuales resultan costosos para grandes columnas rectangulares.



Figura 29. Refuerzo con HUAP en elementos estructurales del puente Mission.

En cimentaciones, el uso del hormigón de ultra alto rendimiento ha destacado en pilotes debido a sus propiedades mecánicas superiores y durabilidad. A diferencia de los pilotes tradicionales compuestos de acero y hormigón, que están sujetos a corrosión y deterioro, el HUAP ofrece una resistencia excepcional a estos problemas. Durante el proceso de hincado, los pilotes de acero pueden experimentar pandeo local, mientras que los pilotes de hormigón pretensado son susceptibles a agrietarse debido a las altas tensiones de tracción y compresión. (ACI 239R-18)

A lo largo de este trabajo, se ha enfatizado el uso del HUAP principalmente en elementos estructurales debido a sus características mecánicas superiores. Sin embargo, el

uso del HUAP se está extendiendo a más ámbitos constructivos, como las fachadas, donde ofrece ventajas significativas como la durabilidad frente a las condiciones climáticas adversas. Además, la calidad del acabado superficial de este material es altamente valorada desde un punto de vista arquitectónico.

Un ejemplo destacado de aplicación del HUAP en fachadas es el Museo de Europa y Civilizaciones Mediterráneas (MuCEM) en Marsella, Francia. En este edificio, paneles de HUAP forman parte tanto de la fachada como del techo, permitiendo controlar la entrada de luz y la incidencia del viento hacia el interior



Figura 30. Museo de Europa y Civilizaciones Mediterráneas y su fachada.

La baja permeabilidad del hormigón de ultra altas prestaciones, junto con su alta resistencia a la abrasión, lo convierte en un material adecuado para entornos corrosivos y hostiles, como instalaciones subterráneas de servicios públicos, estructuras marinas, represas hidroeléctricas y plantas de tratamiento de aguas residuales. Sus propiedades de durabilidad lo posicionan como una alternativa competitiva frente a materiales como el acero inoxidable en aplicaciones en las plantas de tratamiento de aguas residuales. (McCraven 2007).

5.3 Proyección de la demanda a futuro.

Ecuador se caracteriza por tener varias regiones con diferentes tipos de suelo. En la Sierra, los estratos son mayoritariamente de origen volcánico, con presencia de arcillas expansivas y suelos aluviales. En las zonas costeras y amazónicas, los suelos suelen ser blandos y compresibles, predominando los suelos arcillosos y limosos, que no pueden soportar grandes cargas sin un refuerzo adecuado.(Calvache, 2015)

Un factor importante que considerar es el contenido de humedad y el nivel freático del suelo, que presentan una desventaja en comparación con suelos no saturados. Estas condiciones requieren técnicas de mejoramiento del suelo o cimentaciones específicas que se ajusten a las necesidades presentes.

Vargas y Ulloa, en su estudio geotécnico de la zona norte de Guayaquil, evidenciaron una gran variabilidad en la composición de los suelos. La mayor parte de la ciudad se compone de suelos arcillosos, arcillo-limosos y limo-arenosos. Ensayos revelaron que, desde la superficie hasta los 24 metros de profundidad, los suelos son blandos o muy blandos. A partir de los 24 metros, los suelos comienzan a volverse ligeramente rígidos, y a partir de los 33 metros de profundidad se convierten en suelos rígidos o muy rígidos. Este aporte es sumamente relevante para el futuro, ya que proporciona una estimación de la composición del suelo y el método de cimentación y materiales adecuados para asegurar la estabilidad de las edificaciones pues para llegar a los estratos ideales se necesitará profundizar considerablemente en el suelo pues en la ciudad de Guayaquil se encuentran actualmente los edificios de mayor altura en el país además de que están en construcción otros de mayores alturas a las edificaciones presentes.

La creciente urbanización y el aumento de la densidad poblacional en las ciudades de Ecuador están impulsando la necesidad de construir edificios de gran altura. Esta tendencia

responde a la demanda de maximizar el uso del espacio urbano limitado, proporcionando soluciones habitacionales y comerciales eficientes. Además, los edificios altos permiten la integración de tecnologías avanzadas y sostenibles, mejorando la calidad de vida de los habitantes.

En un contexto donde la modernización y el desarrollo económico son prioritarios, la construcción vertical se presenta como una solución estratégica para enfrentar los desafíos de espacio y crecimiento urbano en Ecuador. Por estos motivos entre otros, la Secretaría de Territorio, Hábitat y Vivienda del Municipio autorizó en abril del 2024 la construcción de edificios de hasta 40 pisos para afrontar crecimiento urbano, el nuevo plan urbano de Quito prioriza la construcción vertical para optimizar el uso del suelo y gestionar eficientemente la concentración de la población. Proyectos emblemáticos como IQON, la torre más alta de la ciudad con 130 metros y 32 pisos, ejemplifican este enfoque innovador.



Figura 31. Edificio IQON Norte de Quito (Uribe Schwarzkopf, s. f.)

La urbe está adoptando medidas para enfrentar el rápido crecimiento urbano, que está superando significativamente la tasa de aumento de su población. Datos recientes del Instituto Nacional de Estadística y Censos (INEC) indican que, mientras la población crece a un ritmo del 0,20%, el área urbanizada se expande casi al doble, con un incremento del

0,37%. Esta expansión descontrolada hacia las periferias está generando altos costos en la provisión de servicios básicos.

La resolución planteó que, a lo largo de la Av. Galo Plaza, se permitirá la construcción de torres de hasta 40 pisos, mientras que en el área del parque Bicentenario se autorizarán edificios de entre 20 y 30 pisos. En el centro norte, avenidas como De Los Shyris, Amazonas y 10 de agosto podrán albergar edificios de 24 a 36 pisos, y en La Carolina se permitirán construcciones de hasta 24 pisos. En el sur, específicamente en el sector La Magdalena, se planea aumentar la altura de los edificios existentes de cuatro a seis pisos. En Quitumbe, se permitirá la construcción de edificios de hasta 20 pisos.

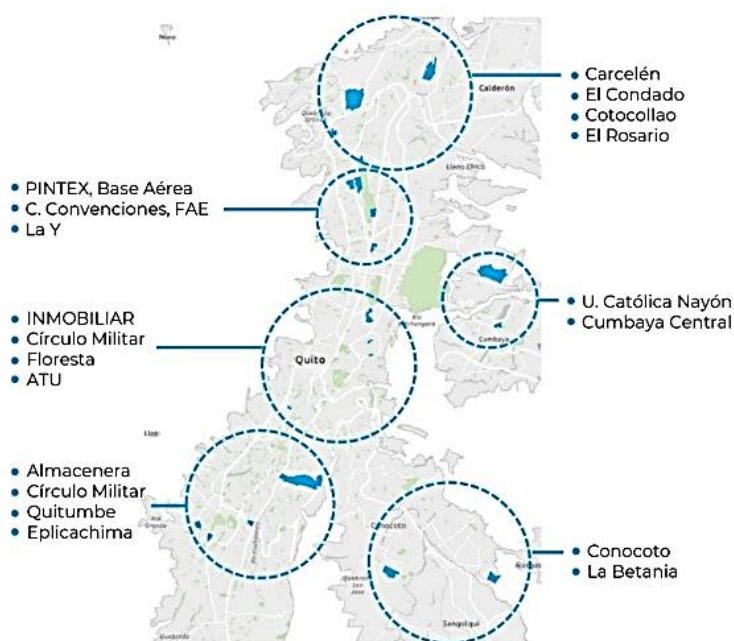


Figura 32. Mapa de Quito donde se muestran los proyectos de reorganización, según el Municipio.

En la actualidad los edificios más altos del país se encuentran en las ciudades de Guayaquil y Quito, siendo así la ciudad costera la que tiene el edificio más alto del país, la Torre The Point con una altura de 137 metros, sin embargo, en esta misma ciudad está en

construcción el Maxximus Guayaquil City Center, cuando finalice su construcción en 2026 con una altura estimada de 184 metros, será el más alto de Ecuador. (Orellana, 2024)

Cabe destacar que, aunque Ecuador no cuenta actualmente con rascacielos, está en constante crecimiento vertical. En el futuro, esto demandará la implementación de nuevas técnicas constructivas y materiales avanzados. La situación actual del país en cuanto a edificaciones de gran altura se resume a continuación:

Tabla 19. Edificios más altos del Ecuador

Nombre del Edificio	Ciudad	Altura (m)	Pisos	Área (m²)	Estado
Maxximus Guayaquil City Center	Guayaquil	184	50	102.000	En construcción
Yoo Guayaquil	Guayaquil	176	46	45.000	En construcción
The Hills	Guayaquil	90m a 143m según la torre	40	70.000	En construcción
The Point	Guayaquil	137	36	50.000	Completado
La Previsora	Guayaquil	135	34	40.000	Completado
IQON	Quito	135	32	36.000	Completado
Grand Diamond Beach Tonsupa	Esmeraldas	126	32	30.000	Completado

Las estructuras actualmente en construcción en el país representarán aproximadamente un tercio de la altura del récord mundial actual, el Burj Khalifa. Este crecimiento constante en altura subraya la necesidad de materiales de construcción más eficientes y resistentes, fundamentales para cumplir con los rigurosos estándares de estructuras de esta escala. En Ecuador, el uso de cimentaciones con pilotes en edificios de gran altura se justifica por la necesidad de garantizar la capacidad de carga, mejorar la respuesta sísmica y superar los desafíos del suelo en diversas regiones del país. Al igual que en el Burj Khalifa y las Torres Petronas, donde las condiciones geotécnicas del suelo y la necesidad de soportar estructuras monumentales condujeron a la elección de pilotes

profundos, en Ecuador se requieren soluciones de cimentación similares para asegurar la seguridad y estabilidad de las construcciones ante condiciones geológicas y sísmicas exigentes.

El uso del hormigón de ultra altas prestaciones en Ecuador promete transformar el panorama de la construcción, ofreciendo soluciones avanzadas para una variedad de aplicaciones como las expuestas anteriormente desde fachadas modernas y eficientes hasta cimentaciones robustas, pasando por puentes innovadores, represas hidroeléctricas y plantas de tratamiento de aguas donde el HUAP demuestra su superioridad en términos de resistencia, durabilidad y rendimiento estructural. Este material no solo promueve la seguridad y la eficiencia en la construcción de infraestructuras clave, sino que también posicionará al país en la vanguardia de la ingeniería civil a la par de países desarrollados.

6. Capítulo VI: Conclusiones y Recomendaciones

6.1 Conclusiones

El presente trabajo ha logrado cumplir con los objetivos planteados. El objetivo general ha sido alcanzado a través de una serie de investigaciones y análisis detallados se ha demostrado que el HUAP ofrece ventajas significativas, entre las cuales se destacan su elevada resistencia y la eficiencia en los procesos constructivos. Sin embargo, aunque el UHPC ofrece beneficios impresionantes en términos de resistencia y durabilidad, su alto costo lo hace menos económico para ciertas aplicaciones. Para pilotes de 40 metros de largo en Ecuador, usar concreto de alta resistencia con medidas apropiadas (como amortiguadores) podría ser una solución más rentable de momento. Mientras no se cuenten con avances tecnológicos que reduzcan considerablemente el costo de producción del HUAP, no será la mejor alternativa en la construcción.

Por otro lado, cada objetivo específico se completó en este trabajo. Tras una recopilación bibliográfica se definió correctamente lo que es el HUAP y se detallaron todas sus características físicas y mecánicas. Se hallaron los costos de los materiales necesarios para la fabricación del HUAP, así como el costo total por m³ (1658.27 \$) de este material en el capítulo 3. Se realizó una comparativa del diseño de distintos pilotes de diferentes materiales, resistencias, pesos y geometrías lo que permitió evidenciar las ventajas del HUAP frente al resto de pilotes en cuanto al comportamiento dinámico durante el proceso de hincado.

En la actualidad, el elevado costo de los materiales que conforman el HUAP en comparación con el hormigón convencional se debe principalmente al uso de componentes de mayor calidad, muchos de los cuales son difíciles de conseguir en el país y, por lo tanto,

deben ser importados. Estos incluyen aditivos especiales y agregados con granulometrías específicas, lo que hace que su costo por metro cúbico sea aproximadamente diez veces mayor que el de los hormigones de resistencias normales. Debido a esto, el HUAP se utiliza principalmente en construcciones donde se anticipan situaciones críticas para la seguridad estructural.

Como se puede observar en el gráfico 8, la arena de cuarzo es el segundo material más caro que compone el HUAP, representando un 42% del costo por metro cúbico. Una forma de reducir significativamente el costo es reemplazar la arena de cuarzo por arena de río, ya que esta última cuesta solo una quinceava parte de la arena de cuarzo. Sin embargo, este cambio de material requiere una dosificación adecuada y diferente a la presentada en este documento, además de los ensayos necesarios para garantizar el comportamiento del HUAP en compresión y tracción entre otras propiedades mecánicas. Actualmente existen aún grandes desafíos ingenieriles que deben superarse, desde barreras de conocimiento hasta barreras técnicas. Al no disponer de suficientes profesionales expertos en la materia y de la tecnología necesaria para la fabricación de ese material, económicamente no es una opción más rentable que el uso de otros materiales que sí son disponibles en el mercado. Sin embargo, los grandes beneficios técnicos que este material puede proporcionar en las estructuras ameritan que se sigan desarrollando este tipo de alternativas constructivas para que en un futuro esta opción sea la más indicada para las cimentaciones profundas.

El área de la sección para el cálculo dinámico es determinante. Esto último debido a que compensa el incremento en rigidez causado por un mayor módulo de elasticidad; una mayor rigidez implica unos esfuerzos internos mayores durante la propagación de la onda. La elección de la sección para el pilote de HUAP cuenta con inercias mayores que aquellas de HS y acero, lo que incide significativamente en su comportamiento a flexión.

En el cálculo del equilibrio estático del pilote se utiliza el perímetro externo en lugar del perímetro real de la sección transversal, lo que implica que el área y perímetro externo considerados deben ser los mismos sin importar el material del pilote, sin embargo, es posible escoger secciones con menos área bruta si en caso la rigidez estructural del elemento así lo permite.

En el caso del pilote de HUAP, si bien constructivamente es más complejo, también se presenta un ligero ahorro en material. Esto último debido a que al tener un mayor módulo de elasticidad proporciona una mayor rigidez axial como a flexión. Esto implica que permite el uso de secciones con menor área bruta e inclusive menor cantidad de acero de refuerzo, aunque para saber con exactitud, es necesario realizar un análisis de las solicitaciones del pilote a flexión, lo cual es algo que no formó parte de este trabajo.

Las pruebas confirmaron que los pilotes de hormigón de ultra altas prestaciones (HUAP) se pueden hincar utilizando cualquier equipo ya sea por tamaño y peso. Esto brinda una gran ventaja en la construcción. Para los pilotes de hormigón, se modelaron cojines de amortiguación, que no bastaron para disipar la energía de hincado de ciertos martillos. Los pilotes de UHPC se modelaron directamente sin cojines, logrando soportar los esfuerzos máximos con cualquier martillo. Los pilotes de acero y de HAR también necesitan cojines para soportar los esfuerzos de compresión máximos a los que se someten, de lo contrario alcanzarían su esfuerzo permitido al hincarse con los martillos más pesados.

A través del análisis y la simulación numérica, se constató que los pilotes de HUAP pueden resistir eficazmente la energía transferida por los martillos de hincado sin necesidad de cojines de amortiguación, lo que simplifica significativamente el proceso de instalación y reduce los costos asociados. Los resultados mostraron que, a diferencia del hormigón simple y del acero, los pilotes de HUAP no sólo soportan mejor los esfuerzos de compresión y

tracción, sino que también ofrecen una excelente resistencia a la corrosión, eliminando la necesidad de tratamientos adicionales y prolongando la vida útil de la estructura. Además, la mayor rigidez y resistencia a la flexión de los pilotes de HUAP contribuyen a reducir la desviación durante la instalación, mejorando la precisión y estabilidad del grupo de pilotes. El uso de HUAP puede mejorar la eficiencia del hincado y acelerar los tiempos de construcción, lo cual es crucial en proyectos de gran envergadura. Por lo tanto, la adopción de HUAP en la construcción de pilotes hincados sí representa una solución técnica superior, sin embargo, sus ventajas económicas únicamente podrían verse en el largo plazo mas no al inicio de su fabricación debido a los altos costos actuales de producción.

6.2 Recomendaciones

El uso de software profesional para el análisis de pilotes representa una ventaja significativa para realizar cálculos dinámicos y estáticos precisos. Aunque el cálculo actual consideró numerosos parámetros, los softwares proporcionan métodos de modelación que se acercan más a la realidad, ofreciendo resultados más exactos. Sin embargo, la dificultad de acceso a estos softwares con licencia impidió realizar comparaciones directas debido a sus elevados costos de adquisición.

Al elaborar un trabajo que requiera información detallada sobre edificios altos en Ecuador y sus tipos de cimentaciones, se enfrenta a la falta de datos y detalles específicos en muchas fuentes. La documentación disponible generalmente ofrece una visión limitada de las estructuras más altas del país y los métodos de cimentación utilizados. Esta carencia de información detallada dificulta la elaboración de análisis exhaustivos y comparativos necesarios para comprender completamente los desafíos y las soluciones en la construcción de edificaciones de gran altura en Ecuador.

Se sugiere anticipar y planificar cuidadosamente la adquisición de materiales que conforman el Hormigón Ultra Alta Prestación (HUAP) en Ecuador en especial en proyectos que requieran de elaboración de probetas y ensayos de laboratorio. Dado que algunos de los materiales deben ser importados debido a la baja demanda local actual, siendo crucial establecer conexiones con proveedores confiables y evaluar las opciones logísticas y costos. Incorporar esta planificación anticipada permitirá asegurar la disponibilidad oportuna de los materiales necesarios para cumplir con los estándares exigidos.

Bibliografía:

Aïtcin, P.-C. (2004). *High-Performance Concrete*. Taylor & Francis e-Library.

American Association of State Highway and Transportation Officials. (2017).

AASHTO LRFD Bridge Design Specifications.

Arellano, M. F., & Fierro, J. O. (2019). *Hormigón De Alta Resistencia Con*

Nanosílice. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Bacuilima, A. R., & Guillén, W. P. (2019). *Diseño de una mezcla de hormigón de*

alta resistencia y su comportamiento en una viga de hormigón armado

sometida a cargas de flexión. Universidad de Cuenca.

Braja M. Das, & Nagaratman Sivakugan. (2019). *Principles of Foundation*

Engineering (I. Cengage Learning, Ed.; 9e ed.). Cengage.

Caijun Shi, Zemei Wu, & Nemkumar Banthia. (2024a). *Ultra-High Performance*

Concrete Design, Performance and Application (CRC Press).

Caijun Shi, Zemei Wu, & Nemkumar Banthia. (2024b). *Ultra-High Performance*

Concrete Design, Performance and Application (CRC Press).

Caijun Shi, Zemei Wu, & Nemkumar Banthia. (2024c). *Ultra-High Performance*

Concrete Design, Performance and Application (CRC Press).

Calvache, Á. (2015). *Los suelos del Ecuador*. 2015.

https://www.researchgate.net/publication/301701400_los_suelos_del_ecuador

CapitalPiling. (2024). *Top Five Deepest Foundations - Capital Piling Ltd | Piling |*

Piling Contractors. [https://www.capitalpiling.co.uk/articles/top-five-deepest-](https://www.capitalpiling.co.uk/articles/top-five-deepest-foundations)

[foundations](https://www.capitalpiling.co.uk/articles/top-five-deepest-foundations)

- Castro, J. D., & Ojeda, G. L. (2019). *Diseño y elaboración de hormigones especiales de alto desempeño*. Universidad de Cuenca.
- Christopher D. White, Reid W. Castrodale, & McLeod C. Nigels. (2004). Precast Prestressed Concrete Piles Chapter 20, Bridge Design Manual. En I. Ralph Whitehead Associates (Ed.), *Bridge Design Manual* (1.^a ed.). Precast Prestressed concrete institute.
- Enríquez Iturralde, A. M. (2018). *Zonificación De La Susceptibilidad De Fenómenos De Remoción En Masa Provocados Por Terremotos En La Ciudad De Portoviejo*. Universidad Central del Ecuador.
- Giroux, G. (2023). *La construcción del Burj Khalifa: una proeza arquitectónica y técnica*. 2023. <https://dubai-immo.com/es/la-construction-du-burj-khalifa-une-prouesse-architecturale-et-technique/>
- IndustrialPhysics. (2024). *¿Qué es el módulo de elasticidad? - Industrial Physics*. <https://industrialphysics.com/es/base-de-conocimientos/articulos/pruebas-de-modulo-de-elasticidad/>
- Landázuri, P. S., & Vásconez, W. M. (2019). *Análisis experimental de las propiedades físico-mecánicas de un hormigón de alta resistencia elaborado con partículas de nanosílice*. Universidad Central.
- Le Hoang, A., & Fehling, E. (2017). Influence of steel fiber content and aspect ratio on the uniaxial tensile and compressive behavior of ultra high performance concrete. *Construction and Building Materials*, 153, 790-806. <https://doi.org/10.1016/J.CONBUILDMAT.2017.07.130>

- Lee, S. L., Chow, Y. K., Karunaratne, G. P., & Wong, K. Y. (1988). Rational Wave Equation Model for Pile-Driving Analysis. *Journal of Geotechnical Engineering*, 114(3), 306-325. [https://doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1988\)114:3\(306\)](https://doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1988)114:3(306))
- Liu, X., Wu, T., & Liu, Y. (2019). Stress-strain relationship for plain and fibre-reinforced lightweight aggregate concrete. *Construction and Building Materials*, 225, 256-272. <https://doi.org/10.1016/j.conbuildmat.2019.07.135>
- Lymon C. Reese, William M. Isenhowe, & Shin-Tower Wang. (2006). *Analysis And Design Of Shallow And Deep Foundations*. John Wiley & Sons.
- Ministerio de desarrollo urbano y vivienda. (2015). *NEC - SE - HM - Hormigón-Armado*.
- Nawy, E. (1996a). *Fundamentals of High Strength High Performance Concrete*.
- Nawy, E. (1996b). *Fundamentals of High Strength High Performance Concrete*.
- Orellana, P. (2024, enero 8). *EL TOP 5 DE LOS EDIFICIOS MAS ALTOS DEL ECUADOR, CONSTRUIDOS Y EN PROCESO*.
<https://es.linkedin.com/pulse/el-top-5-de-los-edificios-mas-altos-del-ecuador-y-en-proceso-fbgxe>
- Ortiz, J., & Vélez, M. (2021a). *Implementación de nanomateriales como Material Cementicio Suplementario (SCM) en el desarrollo de Hormigones de Ultra Alta Resistencia (UHPC)*.
- Ortiz, J., & Vélez, M. (2021b). *Implementación de nanomateriales como Material Cementicio Suplementario (SCM) en el desarrollo de Hormigones de Ultra Alta Resistencia (UHPC)*.

Ortiz Navos, Jonnathan Fabricio, Vélez Hernández, & Efraín Mateo. (2021).

Implementación de nanomateriales como Material Cementicio Suplementario (SCM) en el desarrollo de Hormigones de Ultra Alta Resistencia (UHPC).

Paul W. Forehand, & Joseph L. Reese, J. (1963a). *Pile Driving Analysis using the wave equation* [Science]. Princeton University.

Paul W. Forehand, & Joseph L. Reese, J. (1963b). *Pile Driving Analysis using the wave equation* [Science]. Princeton University.

Pile Buck, I. (2006). *Pile Driving by Pile Buck* (P. E. Don C. Warrington, Ed.). Pile Buck, Inc.

Prego, C. (2023). *Los cimientos de edificio más profundos del mundo se hunden a 120 metros y sostienen estas dos megatorres.*

<https://www.xataka.com/ingenieria-y-megaconstrucciones/cimientos-edificio-profundos-mundo-se-hunden-a-120-metros-sostienen-estas-dos-megatorres>

Uribe Schwarzkopf. (s. f.). Recuperado 15 de junio de 2024, de

<https://www.uribeschwarzkopf.com/>

V. N. S. Murthy. (s. f.). *Geotechnical Engineering - Principles and Practices of Soil Mechanics and Foundation Engineering* (B.J. Clark, Ed.). Marcel Dekker, Inc.

Vargas Celi, J. L., & Ulloa Lamán, J. D. (2015). *Perfil geológico-geotécnico a partir de perfiles geofísicos y columnas estratigráficas en una zona norte de los depósitos deltaicos-estuarinos en guayaquil*. Escuela Superior Politécnica del Litoral.

Voort, T., Suleiman, M., & Sritharan, S. (2008). *Design and Performance Verification of Ultra-High Performance Concrete Piles for Deep Foundations*.

<https://doi.org/10.13140/RG.2.2.16811.49448>

Yépez, F., & Calderón, F. X. (2014). Diseño de hormigones de alto desempeño: alta resistencia a la compresión, trabajabilidad adecuada y alta resistencia a la erosión - abrasión para obras hidráulicas. *ACI Avances en Ciencias e*

Ingenierías, 6(1). <https://doi.org/10.18272/aci.v6i1.162>

Zongjin Li, Xiangming Zhou, Hongyan Ma, & Dongshuai Hou. (2023). *Advanced Concrete Technology* (John Wiley & Sons, Ed.; 2.^a ed.).

Anexo 1: Rutina Python para el modelamiento dinámico.

```

import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt

Jp = 1
L = 40 #m
g = 9.81 #m/s^2
Ap = 0.0366 #m2
num_m = int(L/5)
L_m = L/num_m
gamma_uhpc = 2480 #kgf/m3
it = 44 #fracciones de tiempo o iteraciones
W_martillo = 17.8 #kN
Rated_energy = 58.6 #kJ
efficiency = 0.8
alt_mart = 2.8 #m
W_bloque = (L_m)*Ap*gamma_uhpc #kgf
dt = 0.0003333 #s
Dtg = dt*g# Hormigón
Q = 0.004445 #m
E = 5449363440 #kgf/m2
k = (Ap*E/L_m) #kgf/m
Qp = 472 #kgf
Qs = 244970 #kgf
Qs_seg = Qs/(num_m*2) #kgf
Kp_pnt = (Qp+Qs_seg) / (Q) #kgf/m
Kp_fr = Qs_seg / (Q) #kgf/m

t = np.arange(0, it)
Dm = np.zeros((it, num_m+2))
Vm = np.zeros((it, num_m+2))
Cm = np.zeros((it, num_m+2))
Zm = np.zeros((it, num_m+2))
Fm = np.zeros((it, num_m+2))
Dpm = np.zeros((it, num_m+2))
Rm = np.zeros((it, num_m+2))
V0 = np.sqrt((2*g*efficiency*Rated_energy)/W_martillo) #m/s
Km = np.concatenate([[k/2, k], np.ones(num_m, dtype=int)*k])
Kpm = np.concatenate((np.ones(num_m-1, dtype=int)*Kp_fr, np.array([[Kp_pnt]])))
W = np.concatenate([[1070, W_bloque], np.ones(num_m, dtype=int)*W_bloque)) # Peso en kgf
coefV = (Dtg/W)**(-1)

Vm[0, 0] = V0

```

```

for i in range((it-1)*2):
    for j in range(num_m+2):
        if i % 2 == 0:
            Dm[(i//2)+1, j] = Dm[(i//2), j] + (dt * Vm[(i//2), j])
        else:
            if j == 0:
                Cm[(i//2) + 1, j] = (Dm[(i//2) + 1, j] - Dm[(i//2) + 1, j + 1])
                Fm[(i//2) + 1, j] = Km[j] * Cm[(i//2) + 1, j]
                Zm[(i//2) + 1, j] = -Fm[(i//2) + 1, j]
                Vm[(i//2) + 1, j] = Vm[(i//2), j] + (Zm[(i//2) + 1, j] / (coefV[j]))

            elif j == 1:
                Cm[(i//2) + 1, j] = (Dm[(i//2) + 1, j] - Dm[(i//2) + 1, j + 1])
                Fm[(i//2) + 1, j] = Km[j] * Cm[(i//2) + 1, j]
                Zm[(i//2) + 1, j] = Fm[(i//2) + 1, j - 1] - Fm[(i//2) + 1, j]
                Vm[(i//2) + 1, j] = Vm[(i//2), j] + (Zm[(i//2) + 1, j] / coefV[j])

            elif 1 < j < num_m + 1:
                Cm[(i//2) + 1, j] = (Dm[(i//2) + 1, j] - Dm[(i//2) + 1, j + 1])
                Fm[(i//2) + 1, j] = Km[j] * Cm[(i//2) + 1, j]
                Dpm[(i//2) + 1, j] = Dm[(i//2) + 1, j] - Q

                if Dpm[(i//2) + 1, j] < Dm[(i//2) + 1, j] - Q or Dpm[(i//2) + 1, j] > Dm[(i//2) + 1, j] + Q or Dpm[(i//2) + 1,
                    j] < 0:
                    Dpm[(i//2) + 1, j] = 0
                else:
                    Dpm[(i//2) + 1, j] = Dm[(i//2) + 1, j] - Q

                Rm[(i//2) + 1, j] = Kpm[j-2] * (Dm[(i//2) + 1, j] - Dpm[(i//2) + 1, j]) * (1 + (Jp * Vm[(i//2), j]))
                Zm[(i//2) + 1, j] = Fm[(i//2) + 1, j - 1] - Fm[(i//2) + 1, j] - Rm[(i//2) + 1, j]
                Vm[(i//2) + 1, j] = Vm[(i//2), j] + (Zm[(i//2) + 1, j] / coefV[j])

            elif j == num_m + 1:
                Dpm[(i//2) + 1, j] = Dm[(i//2) + 1, j] - Q

                if Dpm[(i//2) + 1, j] < Dm[(i//2) + 1, j] - Q or Dpm[(i//2) + 1, j] > Dm[(i//2) + 1, j] + Q or Dpm[(i//2) + 1,
                    j] < 0:
                    Dpm[(i//2) + 1, j] = 0
                else:
                    Dpm[(i//2) + 1, j] = Dm[(i//2) + 1, j] - Q

                Rm[(i//2) + 1, j] = Kpm[j-2] * (Dm[(i//2) + 1, j] - Dpm[(i//2) + 1, j]) * (1 + (Jp * Vm[(i//2), j]))
                Zm[(i//2) + 1, j] = Fm[(i//2) + 1, j - 1] - Rm[(i//2) + 1, j]
                Vm[(i//2) + 1, j] = Vm[(i//2), j] + (Zm[(i//2) + 1, j] / coefV[j])

# Buscar el desplazamiento máximo permanente en la última columna de Dpm
desplazamiento_maximo = Dpm[:, -1].max()

# Encontrar la fila donde se produce el desplazamiento máximo permanente
fila_maximo = np.where(Dpm[:, -1] == desplazamiento_maximo)[0][0]

# Imprimir los resultados
print(f'El Desplazamiento máximo permanente de {desplazamiento_maximo} m, se produce en la iteración {fila_maximo}, es decir e

# Graficar las curvas de desplazamientos
nombres_curvas = [f'Masa {i+1}' for i in range(num_m+2)]

for i in range(num_m+2):
    plt.plot(t[:, Dm[:, i]], label=nombres_curvas[i])

plt.plot(t[:, Dpm[:, -1]], label='Dpult')

plt.xlabel('Fracción de tiempo (1/3000 segundos)')
plt.ylabel('Desplazamiento en m')
plt.ylim(0, 0.025)
plt.gca().invert_yaxis()
plt.legend(bbox_to_anchor=(1.05, 1), loc='upper left')
plt.show()

# Graficar las curvas de Velocidad
nombres_curvas = [f'Masa {i+1}' for i in range(num_m+2)]
for i in range(num_m+2):
    plt.plot(t[:, Vm[:, i]], label=nombres_curvas[i])

```

```

plt.xlabel('Fracción de tiempo (1/3000 segundos)')
plt.ylabel('Velocidad (m/s)')
plt.ylim(-2, 8)
plt.legend(bbox_to_anchor=(1.05, 1), loc='upper left')
plt.show()

# Graficar las curvas de Fuerzas
nombres_curvas = [f"Masa {i+1}" for i in range(num_m+1)]
for i in range(num_m+1):
    plt.plot(t[:,], Fm[:,i], label=nombres_curvas[i])

plt.plot(t[:,], Rm[:, -1], label='Rult')

plt.xlabel('Fracción de tiempo (1/3000 segundos)')
plt.ylabel('Fuerzas (kgf)')
plt.ylim(0, 300000)
plt.legend(loc='upper center', bbox_to_anchor=(0.5, -0.15), shadow=True, ncol=4)
plt.show()

#Resistencia última Ru:
Ru = np.zeros(it)
for i in range(it):
    sumatoria = 0
    for j in range(num_m+2):
        sumatoria += Rm[i, j]

    Ru[i] = sumatoria*0.001 #convertir a tonf

print(f'La resistencia máxima del pilote es: {Ru.max()} tonf')

plt.plot(t, Ru)
plt.xlabel('Fracción de tiempo (1/3000 segundos)')
plt.ylabel('Resistencia última del pilote (tonf)')
plt.ylim(0, 325)
plt.show()

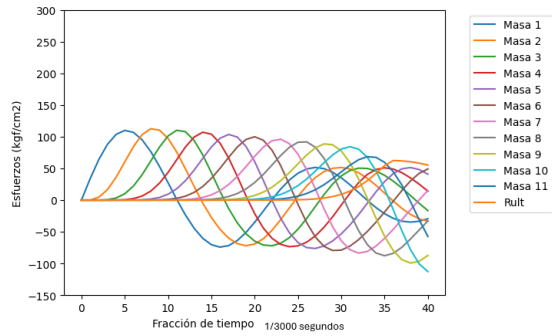
display(pd.DataFrame(Dm).style.set_caption('Desplazamientos'))

```

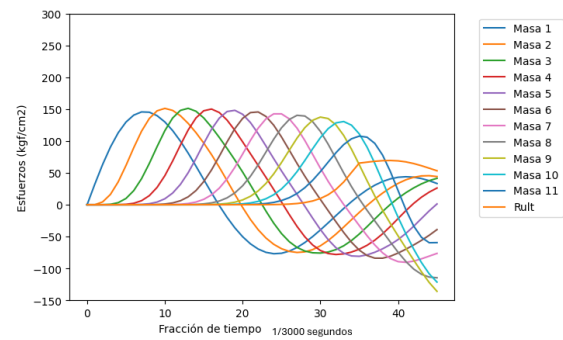
El Desplazamiento máximo permanente de 0.0014283733573040164 m, se produce en la iteración 43, es decir en 0.14 segundos

Anexo 2: Curvas de esfuerzos de cada masa para cada caso.

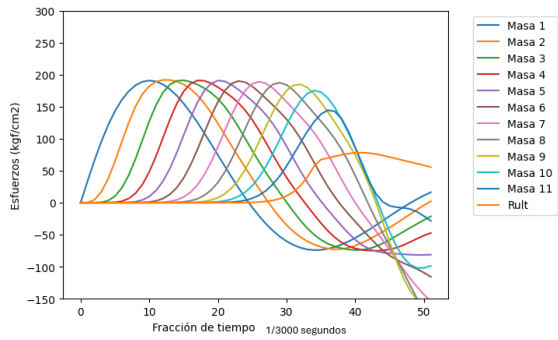
Curvas de esfuerzos con martillo D8 – 22, Suelo Portoviejo, Pilote de hormigón Simple + cojín



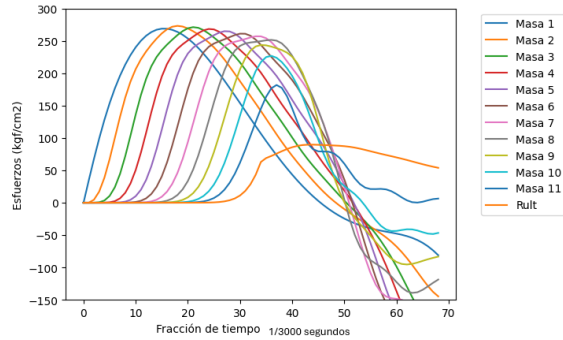
Curvas de esfuerzos con martillo D19 – 42, Suelo Portoviejo Pilote de hormigón Simple + cojín



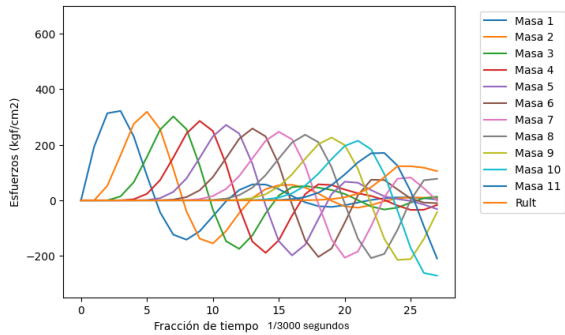
Curvas de esfuerzos con martillo D36 – 32, Suelo Portoviejo Pilote de hormigón Simple + cojín



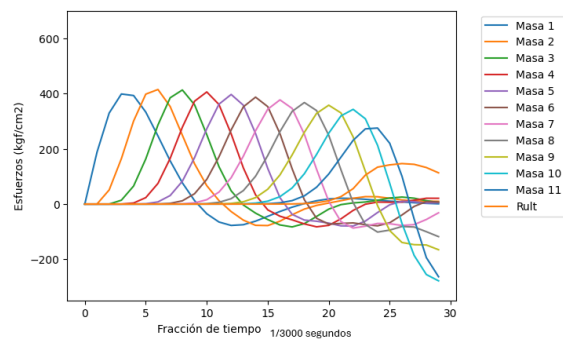
Curvas de esfuerzos con martillo D100 – 13, Suelo Portoviejo Pilote de hormigón Simple + cojín



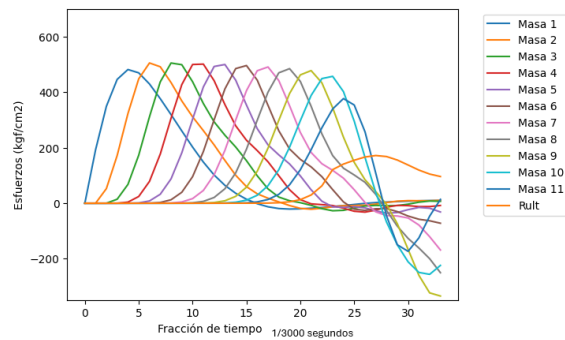
Curvas de esfuerzos con martillo D8 – 22, Suelo Portoviejo, Pilote de hormigón de alta resistencia



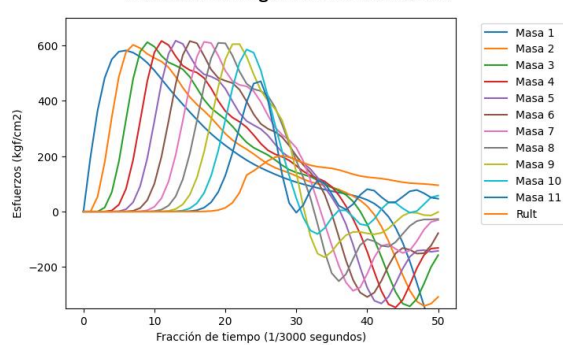
Curvas de esfuerzos con martillo D19 – 42, Suelo Portoviejo Pilote de hormigón de alta resistencia



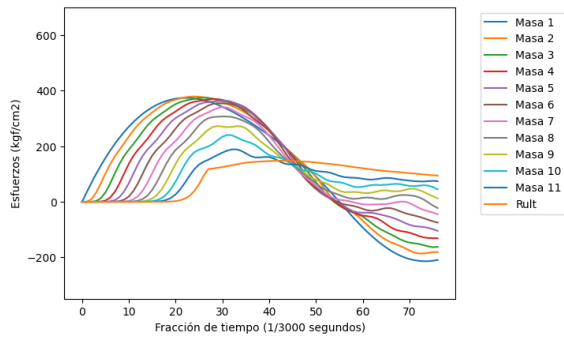
Curvas de esfuerzos con martillo D36 – 32, Suelo Portoviejo Pilote de hormigón de alta resistencia



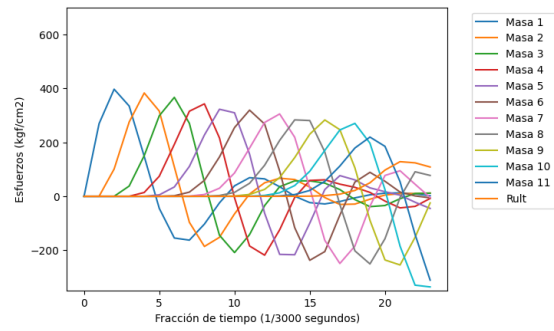
Curvas de esfuerzos con martillo D100 – 13, Suelo Portoviejo Pilote de hormigón de alta resistencia



**Curvas de esfuerzos con martillo D100 – 13, Suelo Portoviejo
Pilote de hormigón de alta resistencia + cojín**

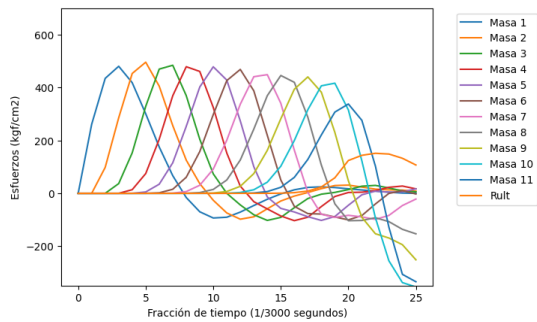


**Curvas de esfuerzos con martillo D8 – 22, Suelo Portoviejo,
Pilote de HUAP**

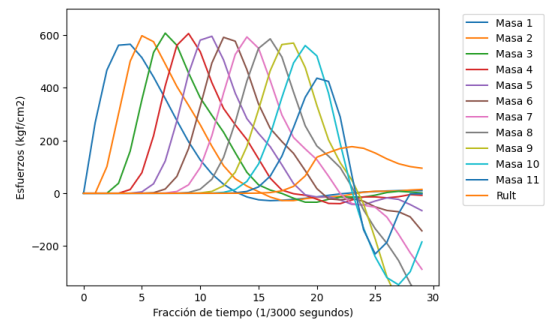


El Desplazamiento máximo permanente de 0.00185545876485432 m

**Curvas de esfuerzos con martillo D19 – 42, Suelo Portoviejo
Pilote de HUAP**

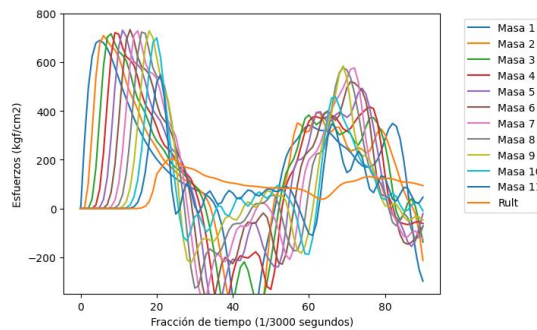


**Curvas de esfuerzos con martillo D36 – 32, Suelo Portoviejo
Pilote de HUAP**



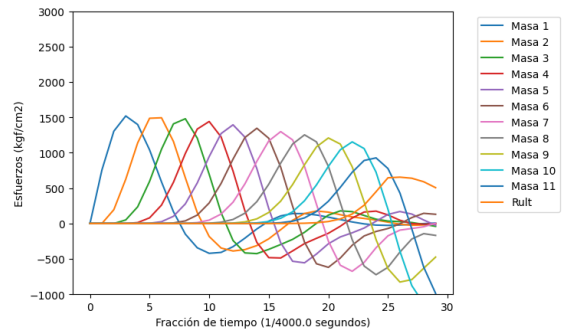
El Desplazamiento máximo permanente de 0.006275188965864511 m

**Curvas de esfuerzos con martillo D100 – 13, Suelo Portoviejo
Pilote de HUAP**



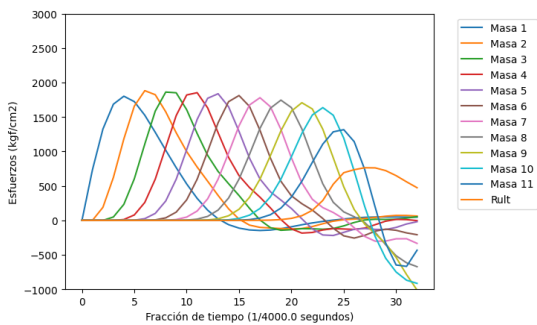
El Desplazamiento máximo permanente de 0.012633237201438592 m

**Curvas de esfuerzos con martillo D8 – 22, Suelo Portoviejo,
Pilote de Acero**



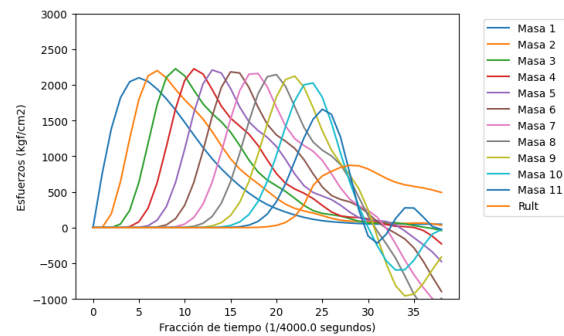
El Desplazamiento máximo permanente de 0.035793572521730474 m

**Curvas de esfuerzos con martillo D19 – 42, Suelo Portoviejo
Pilote de Acero**



El Desplazamiento máximo permanente de 0.002728819141662143 m

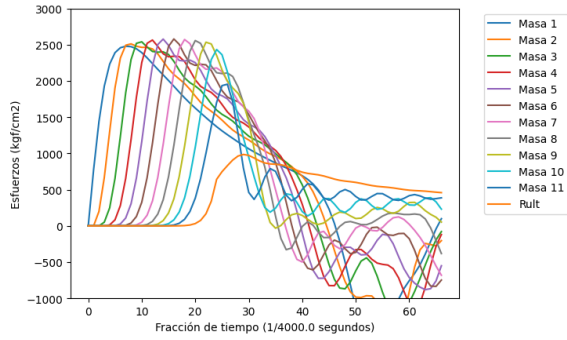
**Curvas de esfuerzos con martillo D36 – 32, Suelo Portoviejo
Pilote de Acero**



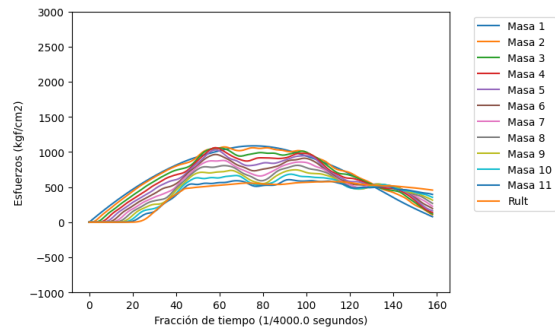
El Desplazamiento máximo permanente de 0.007272252659152519 m

El Desplazamiento máximo permanente de 0.014947864053803148 m

**Curvas de esfuerzos con martillo D100 – 13, Suelo Portoviejo
Pilote de Acero**

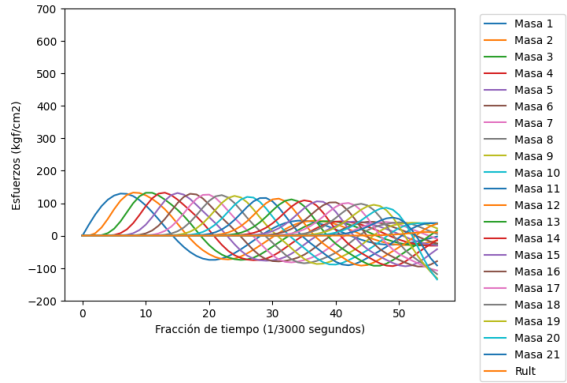


**Curvas de esfuerzos con martillo D100 – 13, Suelo Portoviejo
Pilote de Acero + cojín**



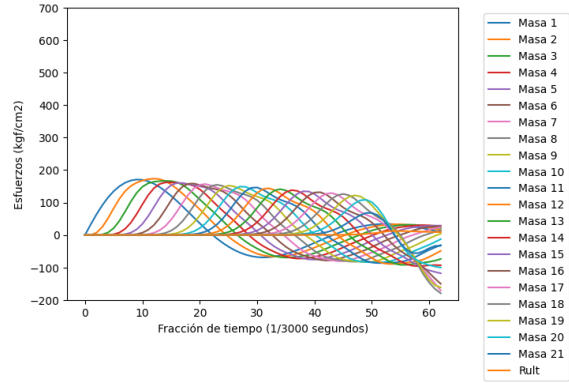
El Desplazamiento máximo permanente de 0.04261466940246005 m

**Curvas de esfuerzos con martillo D8 – 22, Suelo Guayaquil
Pilote de hormigón Simple + cojín**

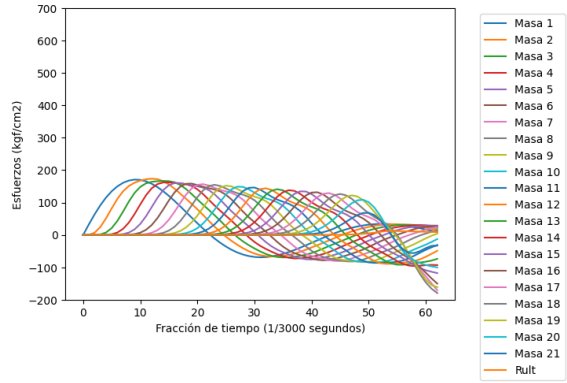


El Desplazamiento máximo permanente de 0.03972566500491864 m

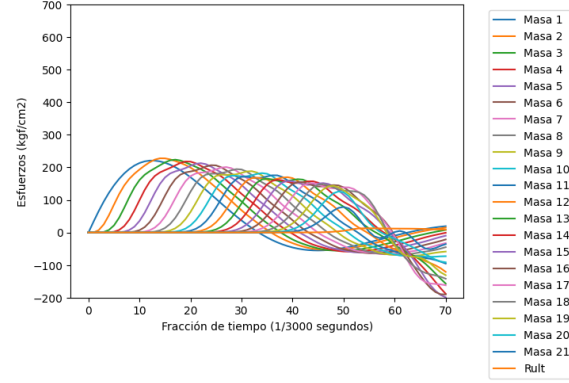
**Curvas de esfuerzos con martillo D19 – 42, Suelo Guayaquil
Pilote de hormigón Simple + cojín**



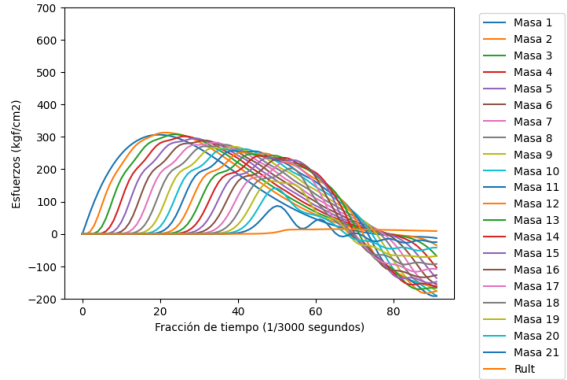
**Curvas de esfuerzos con martillo D19 – 42, Suelo Guayaquil
Pilote de hormigón Simple + cojín**



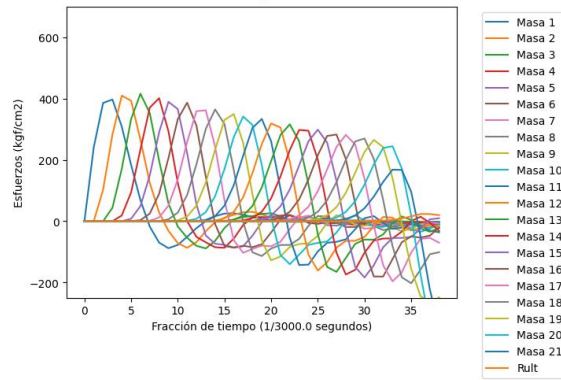
**Curvas de esfuerzos con martillo D36 – 32, Suelo Guayaquil
Pilote de hormigón Simple + cojín**



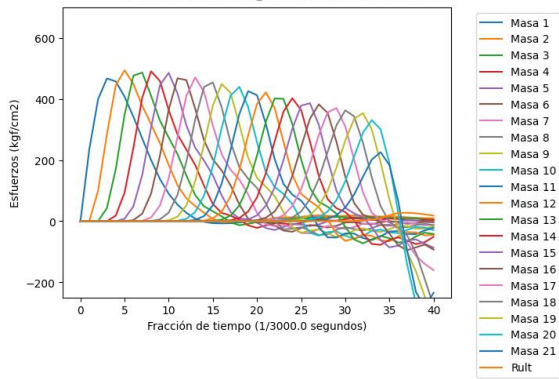
**Curvas de esfuerzos con martillo D100 – 13, Suelo Guayaquil
Pilote de hormigón Simple + cojín**



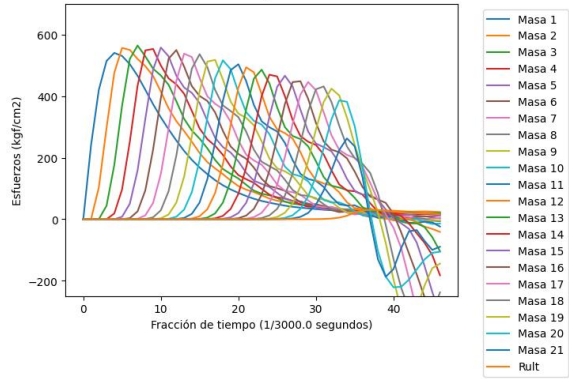
**Curvas de esfuerzos con martillo D8 – 22, Suelo Guayaquil
Pilote de hormigón de alta resistencia**



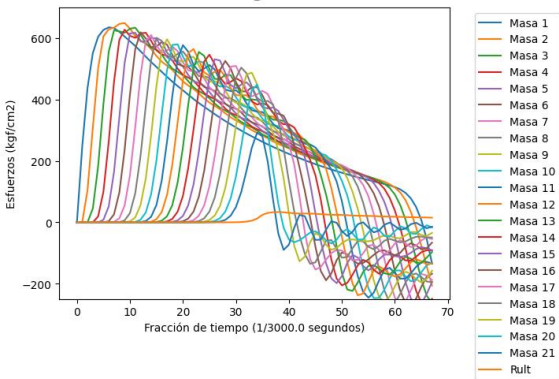
**Curvas de esfuerzos con martillo D19 – 42, Suelo Guayaquil
Pilote de hormigón de alta resistencia**



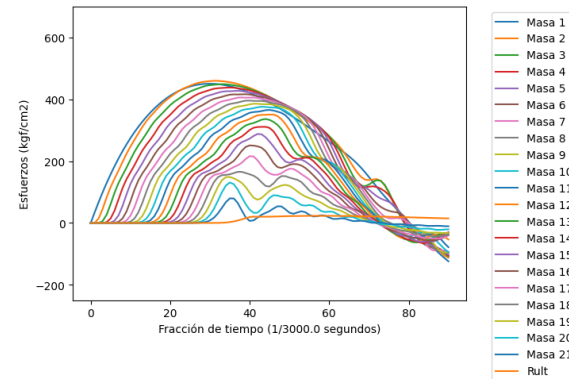
**Curvas de esfuerzos con martillo D36 – 32, Suelo Guayaquil
Pilote de hormigón de alta resistencia**



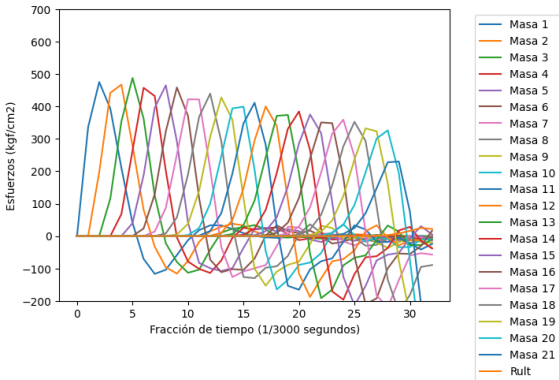
**Curvas de esfuerzos con martillo D100 – 13, Suelo Guayaquil
Pilote de hormigón de alta resistencia**



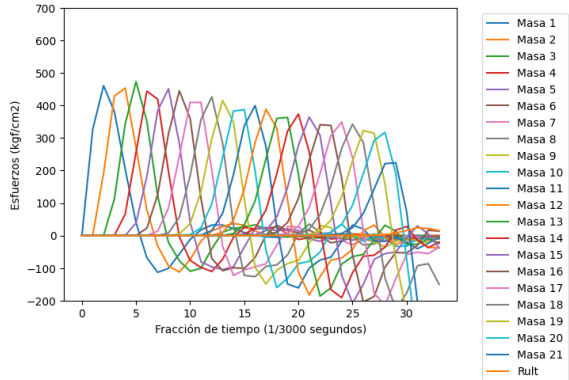
**Curvas de esfuerzos con martillo D100 – 13, Suelo Guayaquil
Pilote de hormigón de alta resistencia + cojín**



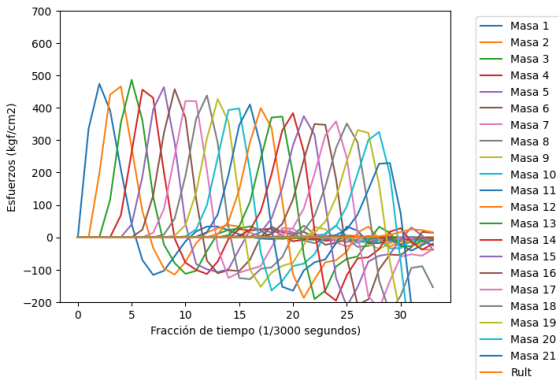
**Curvas de esfuerzos con martillo D8 – 22, Suelo Guayaquil
Pilote de hormigón de ultra altas prestaciones**



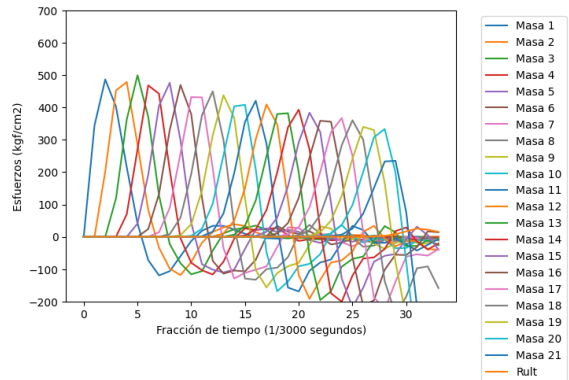
**Curvas de esfuerzos con martillo D19 - 42, Suelo Guayaquil
Pilote de hormigón de ultra altas prestaciones**



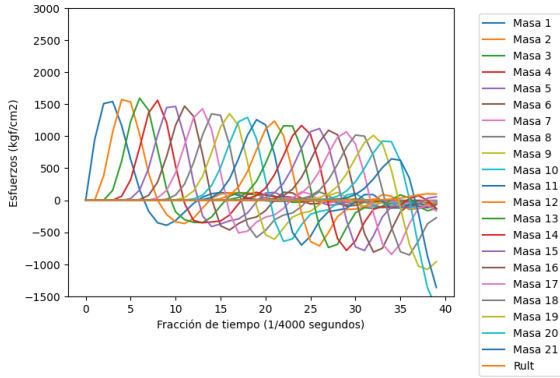
**Curvas de esfuerzos con martillo D36 - 32, Suelo Guayaquil
Pilote de hormigón de ultra altas prestaciones**



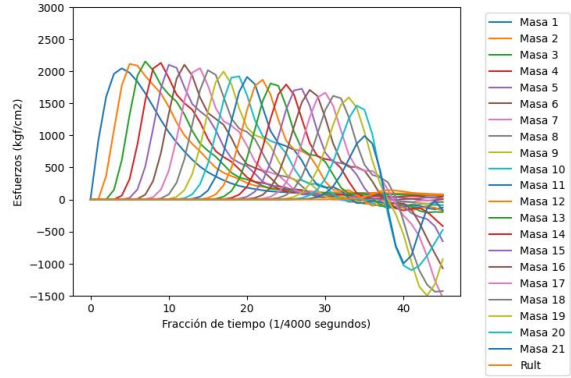
**Curvas de esfuerzos con martillo D100 – 13, Suelo Guayaquil
Pilote de hormigón de ultra altas prestaciones**



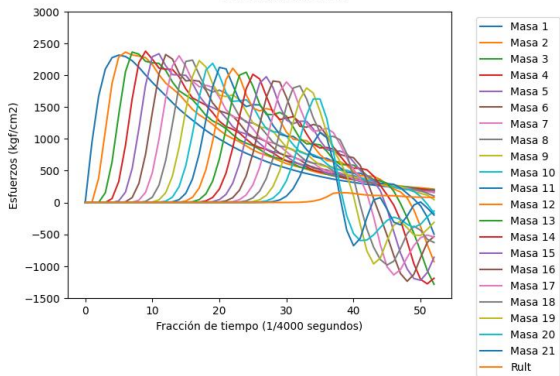
**Curvas de esfuerzos con martillo D8 – 22, Suelo Guayaquil
Pilote de acero**



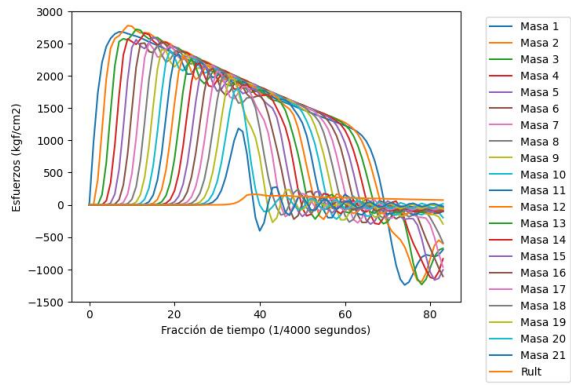
**Curvas de esfuerzos con martillo D19 – 42, Suelo Guayaquil
Pilote de acero**



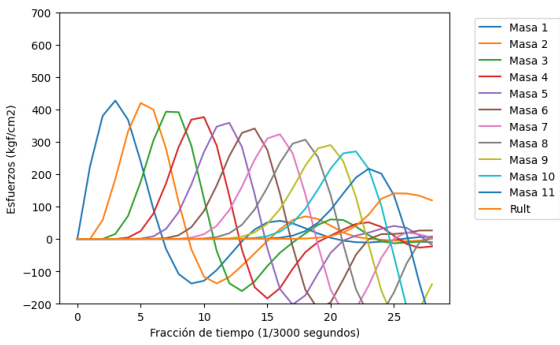
**Curvas de esfuerzos con martillo D36 – 32, Suelo Guayaquil
Pilote de acero**



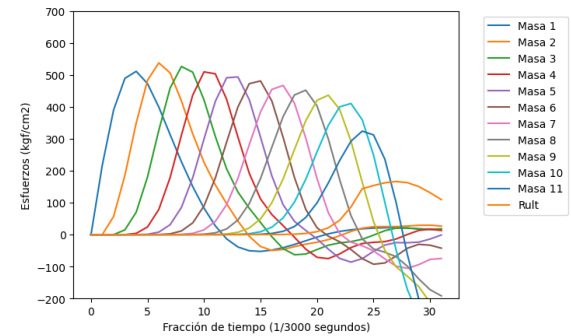
**Curvas de esfuerzos con martillo D100 – 13, Suelo Guayaquil
Pilote de acero**



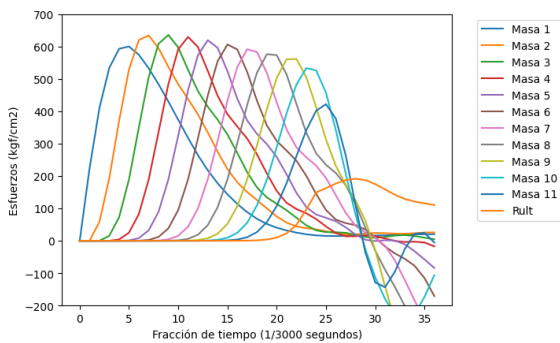
**Curvas de esfuerzos con martillo D8 – 22, Suelo Portoviejo
Pilote de hormigón de ultra altas prestaciones**



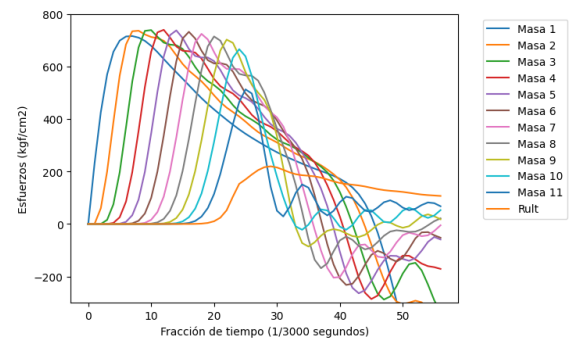
**Curvas de esfuerzos con martillo D19 – 42, Suelo Portoviejo
Pilote de hormigón de ultra altas prestaciones**



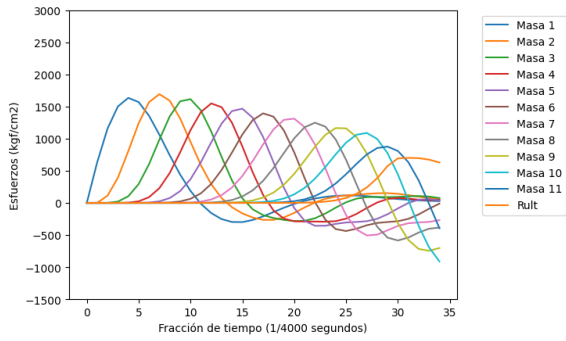
**Curvas de esfuerzos con martillo D36 – 32, Suelo Portoviejo
Pilote de hormigón de ultra altas prestaciones**



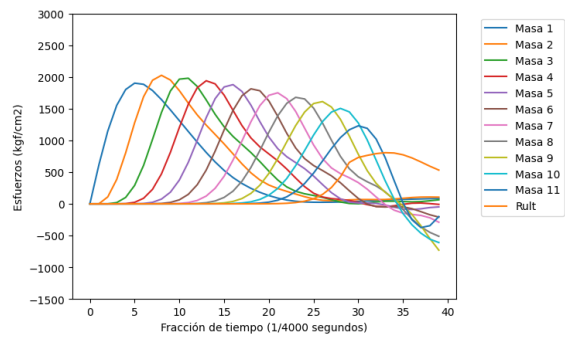
**Curvas de esfuerzos con martillo D100 – 13, Suelo Portoviejo
Pilote de hormigón de ultra altas prestaciones**



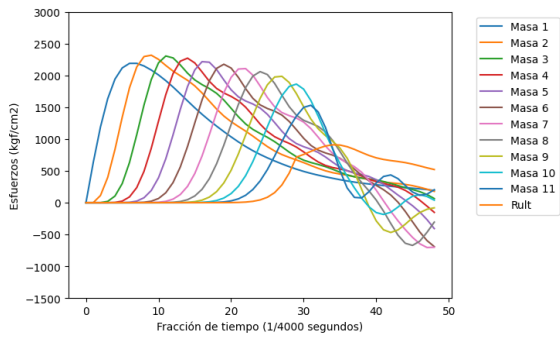
**Curvas de esfuerzos con martillo D8 – 22, Suelo Guayaquil
Pilote de acero**



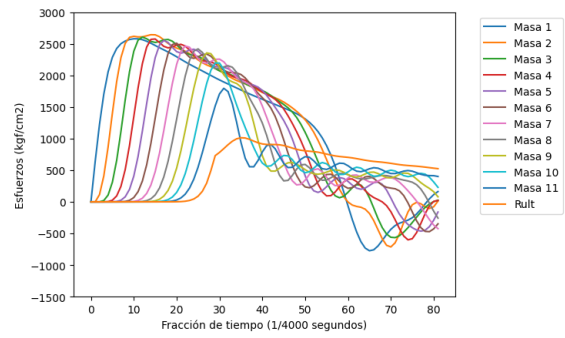
**Curvas de esfuerzos con martillo D19 – 42, Suelo Portoviejo
Pilote de acero**



**Curvas de esfuerzos con martillo D36 – 32, Suelo Portoviejo
Pilote de acero**



**Curvas de esfuerzos con martillo D100 – 13, Suelo Portoviejo
Pilote de acero**



Anexo 3: Cálculo de resistencia del suelo y Dimensionamiento de las secciones de los pilotes.

Resistencia del pilote para suelos medianamente competentes

```
import Ks
import delt_phi
import numpy as np
import pandas as pd
import matplotlib.pyplot as plt
```

```
Pu = 350 #Tonf

L = 25 #m
pa = 100 #kN/m2
g = 9.81 #m*s^-2
Limite = 0

Ap = 0.25 #m2 p.109 tesis uhpc_def ; Ap = 0.0366

while 1:

    d0 = np.sqrt(Ap) #Lado del area Ap en m.
    p = (2*d0) + (0.72*d0) + (4*np.sqrt(((d0*0.4)**2) + ((d0*0.1)**2))) + (0.88*d0)

    Profundidades = np.array([7, 13, 21, 25, L]) #Profundidades = np.array([7, 13, 21, 25, L])
    gamma = np.array([11.5, 12, 11, 12, 15]) #kN/m3 gamma = np.array([11.5, 12, 11, 12, 15]) #kN/m3
    cu = np.array([40, 55, 25, 15, 100]) #kN/m2 cu = np.array([40, 55, 25, 15, 100]) #kN/m2

    # Profundidades = Profundidades[:-Limite]
    # gamma = gamma[:-Limite]
    # cu = cu[:-Limite]

    #Calcular sigma0

    nf = 25
    gammaw = 9.81 #kN/m3 Peso específico del agua
    u = np.zeros(len(Profundidades)) #Presión de poros
    sigma0 = np.zeros(len(Profundidades))
    sigma0[0] = Profundidades[0] * gamma[0]
    u[0] = 0 #Profundidades[0] * gammaw
    for i in range(1, len(Profundidades)):
        sigma0[i] = ((Profundidades[i] - Profundidades[i-1]) * gamma[i]) + sigma0[i-1]
        if Profundidades[i]>nf:
            u[i] = (Profundidades[i] - Profundidades[i-1]) * gammaw

    sigma0 = sigma0 - u
    sigma0 = np.insert(sigma0, 0, 0)
    Profundidades = np.insert(Profundidades, 0, 0)
```

```

# Cálculo de Las integrales en intervalos específicos
integrales = []

for i in range(len(Profundidades) - 1):
    inicio = Profundidades[i]
    fin = Profundidades[i + 1]
    indices = np.where((Profundidades >= inicio) & (Profundidades <= fin))
    integral = np.trapz(sigma0[indices], Profundidades[indices])
    integrales.append(integral)

#Calculo de cu

tramos = []
cu_arr = []
for i in range(len(Profundidades)-1):
    tramos.append(Profundidades[i+1] - Profundidades[i])
    cu_arr.append(cu[i]*tramos[i])

cu = sum(cu_arr)/L

#Resistencia en punta

d0 = np.sqrt(Ap) #Lado deL area Ap en m.
#Dimensiones para La sección de HUAP.
D = d0*100
tf = 0.18 * D
tw = 0.2 * D
hw = 0.44 * D
ee = 0.1 * D

#Dimensiones para La sección de Acero.
Da = d0*100
tfa = 0.04 * D
twa = 0.04 * D
hwa = 0.9 * D

V = ((D*tf*2)+(2*ee*((D/2)-(tw/2)))+(tw*(hw+(2*ee))))*0.00107639
Area = ((D*tf*2)+(2*ee*((D/2)-(tw/2)))+(tw*(hw+(2*ee))))
Areaa = (Da*tfa*2) + (twa*hwa)

b = np.sqrt((4*Ap)/np.pi)
D_b = L/b

Kd = []
phi = [18, 26, 15, 10, 28] #grados
for i in range(len(phi)):

    Kd.append(Ks.Ks(round(V,0), phi[i], V))

Cf = [0.98, 0.96, 0.99, 1, 0.94]
alphan = [0.195, 0.375, 0.14, 0.1, 0.46]
Nq = [7.14, 25.49, 4.63, 2.41, 36.39]

# phi = phi[:-Limite]
# Kd = Kd[:-Limite]
# Cf = Cf[:-Limite]
# alphan = alphan[:-Limite]
# Nq = Nq[:-Limite]

rel_delt_phi = delt_phi.delt(V)

delta = []
Dd = []
sigmapd = []
for z in range(len(phi)):
    delta.append(rel_delt_phi*phi[z])
    Dd.append(Profundidades[z+1] - Profundidades[z])
    sigmapd.append(((sigma0[z+1]+sigma0[z])/2))

```

```

Qs_arr = []
Qp_arr = []
for z in range(len(phi)):
    Qp_arr.append(alphat[z]*Nq[z]*Ap*sigma0[z+1])
    Qs_arr.append(kd[z]*Cf[z]*(sigmapd[z]*np.sin(delta[z]*(np.pi/180))*p*Dd[z])

Qp = Qp_arr[-1]
Qs = np.sum(Qs_arr[:])
Qu = (Qp + Qs)/g

Ap+=0.001

if Qu > Pu:

    print("Integrales en intervalos específicos:")
    for i, integral in enumerate(integrales):
        intervalo = f"[{Profundidades[i]} - {Profundidades[i+1]}]"
        print(f"Integral en el intervalo {intervalo}: {integral} kN/m2")

    print(f'El volumen de tierra movido es: {V} ft3/ft')
    print(f'El area exacta de la sección de UHPC es : {Area} cm2 o {Area/10000} m2 ')
    print(f'El area exacta de la sección de acero es : {Areaa} cm2 o {Areaa/10000} m2 \n ')
    print(f'\nEl Area del pilote (Sólo area exterior) Ap = {round(Ap,3)} m2')
    print(f'Perimetro del pilote (Sólo cuadrado exterior) p = {round(p,3)} m')

    print(f'\nLa resistencia en punta del pilote Qp es: {Qp/g} Tonf.')
    print(f'La resistencia en fricción del pilote Qs es: {Qs/g} Tonf.')

    print(f'La fuerza total Pu = {Pu} Tonf')
    print(f'La resistencia total Qu es: {Qu} Tonf.')

```

```

Integrales en intervalos específicos:
Integral en el intervalo [0 - 7]: 281.75 kN/m2
Integral en el intervalo [7 - 13]: 699.0 kN/m2
Integral en el intervalo [13 - 21]: 1572.0 kN/m2
Integral en el intervalo [21 - 25]: 1058.0 kN/m2
Integral en el intervalo [25 - 25]: 0.0 kN/m2
El volumen de tierra movido es: 2.439444184800001 ft3/ft
El area exacta de la sección de UHPC es : 2266.320000000001 cm2 o 0.2266320000000001 m2
El area exacta de la sección de acero es : 462.8400000000026 cm2 o 0.04628400000000027 m2

```

El Area del pilote (Sólo area exterior) Ap = 0.4 m2

Perimetro del pilote (Sólo cuadrado exterior) p = 3.316 m

```

La resistencia en punta del pilote Qp es: 196.42175770642206 Tonf.
La resistencia en fricción del pilote Qs es: 154.08958006095543 Tonf.
La fuerza total Pu = 350 Tonf
La resistencia total Qu es: 350.5113377673775 Tonf.

```

Resistencia del pilote para suelos chesivos

$$Q_p = A_p q_p = A_p c_u N_c^*$$

$$N_c^* = \frac{4}{3} (\ln I_{rr} + 1) + \frac{\pi}{2} + 1$$

```

Pu = 350 #Tonf
Qu = 0
Ap = 0.0001 #m2 p.109 tesis uhpc_def ;
g = 9.81 #m*s^-2
kNtotonf = 1/g

while Pu > Qu:

    L = 40 #m
    d0 = np.sqrt(Ap) #Lado del area Ap en m.
    p = (2*d0) + (0.72*d0) + (4*np.sqrt(((d0*0.4)**2) + ((d0*0.1)**2))) + (0.88*d0)
    pa = 100 #kN/m2

    lmbda = 0.127 #BrjaDas p.481
    gammaw = 9.81 #Peso específico del agua en kN/m3
    Profundidades = np.array([1.3, 2.7, 5.575, 8.45, 10.25, 12.95, 40]) #m
    gamma = np.array([16, 16, 18, 18, 16, 18, 16]) #kN/m3
    cu = np.array([26, 26, 4, 6, 20, 6, 15]) #kN/m2

    #Calculo de resistencia en punta pr metodo de Vesic
    cu_pa = cu[-1]/pa
    Ir = (347*cu_pa) - 33
    Irr = Ir #En arcillas saturadas con phi = 0
    Nc = ((4/3)*(np.log(Irr) + 1)) + (np.pi/2) + 1

    Qpv = Ap*cu[-1]*Nc #kN

    Qpm = 9*cu[-1]*Ap #Calculo de resistencia en punta pr metodo de Meyerhoff

    Qp = (Qpm + Qpv)/2

    #Calculo de resistencia a fricción metodo Lambda
    # Calcular sigma0
    nf = 0
    u = np.zeros(len(Profundidades)) #Presión de poros
    sigma0 = np.zeros(len(Profundidades))
    sigma0[0] = Profundidades[0] * gamma[0]
    u[0] = Profundidades[0] * gammaw
    for i in range(1, len(Profundidades)):
        sigma0[i] = ((Profundidades[i] - Profundidades[i-1]) * gamma[i]) + sigma0[i-1]
        if Profundidades[i]>nf:
            u[i] = (Profundidades[i] - Profundidades[i-1]) * gammaw

    sigma0 = sigma0 - u
    sigma0 = np.insert(sigma0, 0, 0)
    Profundidades = np.insert(Profundidades, 0, 0)

    # Cálculo de las integrales en intervalos específicos
    integrales = []

    for i in range(len(Profundidades) - 1):
        inicio = Profundidades[i]
        fin = Profundidades[i + 1]
        indices = np.where((Profundidades >= inicio) & (Profundidades <= fin))
        integral = np.trapz(sigma0[indices], Profundidades[indices])
        integrales.append(integral)

    #Calculo de cu
    tramos = []
    cu_arr = []
    for i in range(len(Profundidades)-1):
        tramos.append(Profundidades[i+1] - Profundidades[i])
        cu_arr.append(cu[i]*tramos[i])

    cu = sum(cu_arr)/L

    #Metodo Lambda
    sigma_prom = np.sum(integrales)/L
    fav = lmbda*(sigma_prom + (2*cu))
    Qs = p*L*fav
    Qu = kNtotonf*(Qp + Qs) #Tonf

    Ap+=0.0001

#Dimensiones para la sección de HUAP.
D = d0*100
tf = 0.18 * D
tw = 0.2 * D
hw = 0.44 * D
ee = 0.1 * D

#Dimensiones para la sección de Acero.
Da = d0*100
tfa = 0.04 * D
twa = 0.04 * D

```

```

hwa = 0.9 * D
...
Revisar documento: T-UCSG-PRE-ING-IC-149 pagina 119
Revisar documento: IADOT_tr_558_Design_Performa... pagina 108
Revisar documento: BrajaDas Principles of Foundation engineering... pagina 480
...

print("Integrales en intervalos específicos:")
for i, integral in enumerate(integrales):
    intervalo = f"[{Profundidades[i]} - {Profundidades[i+1]}]"
    print(f"Integral en el intervalo {intervalo}: {integral} kN/m2")

print(f'\nEl Area del pilote (Sólo area exterior) Ap = {round(Ap,2)} m2')
print(f'Perimetro del pilote (Sólo cuadrado exterior) p = {round(p,2)} m')
print(f'La longitud del patín D = {round(D, 2)} cm')
print(f'La longitud del ala hw = {round(hw, 2)} cm')
print(f'El espesor del patín tf = {round(tf, 2)} cm')
print(f'El espesor del ala tw = {round(tw, 2)} cm')
print(f'La altura de cuña ee = {round(ee, 2)} cm')

V = ((D*tf*2)+(2*ee*((D/2)-(tw/2)))+(tw*(hw+(2*ee))))*0.00107639
Area = ((D*tf*2)+(2*ee*((D/2)-(tw/2)))+(tw*(hw+(2*ee))))
Areaa = (Da*tf*a*2) + (twa*hwa)
print(f'El volumen de tierra movido es: {V} ft3/ft')
print(f'El area exacta de la sección de UHPC es : {Area} cm2 o {Area/10000} m2 ')
print(f'El area exacta de la sección de acero es : {Areaa} cm2 o {Areaa/10000} m2 \n ')

print(f'La resistencia en punta Qp por Vesic es = {Qpv} kN')
print(f'La resistencia en punta Qp por Meyerhoff es = {Qpm} kN')
print(f'La resistencia en punta Qp es = {Qp} kN\n')

print(f'Sigma promedio es {sigma_prom} kN/m2')
print(f'cu promedio es {cu} kN/m2')
print(f'El esfuerzo total por fricción (fav) es {fav} kN/m2')
print(f'La fuerza total de fricción Qs = {Qs} kN\n')

print(f'La fuerza total Pu = {Pu} Tonf')
print(f'La Resistencia total del suelo Qu = {Qu} Tonf')

```

Integrales en intervalos específicos:

Integral en el intervalo [0.0 - 1.3]: 5.230549999999999 kN/m2
Integral en el intervalo [1.3 - 2.7]: 26.2591 kN/m2
Integral en el intervalo [2.7 - 5.575]: 138.30510937500003 kN/m2
Integral en el intervalo [5.575 - 8.45]: 266.2860937499999 kN/m2
Integral en el intervalo [8.45 - 10.25]: 248.7044250000001 kN/m2
Integral en el intervalo [10.25 - 12.95]: 479.86424999999986 kN/m2
Integral en el intervalo [12.95 - 40.0]: 7968.287562499999 kN/m2

El Area del pilote (Sólo area exterior) Ap = 0.25 m2

Perimetro del pilote (Sólo cuadrado exterior) p = 2.61 m

La longitud del patín D = 49.81 cm

La longitud del ala hw = 21.92 cm

El espesor del patín tf = 8.97 cm

El espesor del ala tw = 9.96 cm

La altura de cuña ee = 4.98 cm

El volumen de tierra movido es: 1.5168573991199328 ft3/ft

El area exacta de la sección de UHPC es : 1409.20799999999376 cm2 o 0.140920799999999377 m2

El area exacta de la sección de acero es : 287.7959999999872 cm2 o 0.02877959999999872 m2

La resistencia en punta Qp por Vesic es = 29.152565488169703 kN

La resistencia en punta Qp por Meyerhoff es = 33.49349999999851 kN

La resistencia en punta Qp es = 31.32303274408411 kN

Sigma promedio es 228.32342726562496 kN/m2

cu promedio es 13.922500000000003 kN/m2

El esfuerzo total por fricción (fav) es 32.53339026273437 kN/m2

La fuerza total de fricción Qs = 3402.5092309094357 kN

La fuerza total Pu = 350 Tonf

La Resistencia total del suelo Qu = 350.0338698933252 Tonf