



**GRADUS**  
EDITORA

**DEPÓSITOS DE  
RELAVE Y SU  
COMPORTAMIENTO  
SÍSMICO  
GEOTÉCNICO DESDE  
UNA PERSPECTIVA  
BIDIMENSIONAL**

Reynaldo Melquiades Reyes Roque  
Santiago Alberto Casas Luna  
Carlos Enrique Coacalla Castillo  
César Gerardo León Velarde



**DEPÓSITOS DE  
RELAVE Y SU  
COMPORTAMIENTO  
SÍSMICO  
GEOTÉCNICO DESDE  
UNA PERSPECTIVA  
BIDIMENSIONAL**

Reynaldo Melquiades Reyes Roque  
Santiago Alberto Casas Luna  
Carlos Enrique Coacalla Castillo  
César Gerardo León Velarde



## Dados Catalográficos

REYES ROQUE, R. M. Et. al. Depósitos de relave y su  
comportamiento sísmico geotécnico  
desde una perspectiva bidimensional.

1a Ed: Gradus Editora. Brasil. 134 p. 2023

ISBN: 978-65-88496-38-1 | DOI: 10.46848/9786588496381

Todos os autores cedem os direitos autorais da obra para a Gradus Editora, impossibilitando a reprodução por outras editoras ou meios de veiculação de materiais didáticos, científicos e acadêmicos de cunho comercial, não comercial, associação científica ou cultural, bem como Instituições de Pesquisa, pelo prazo de exploração de 70 anos, conforme Lei 9.610/98.



Todo o conteúdo deste livro está licenciado sob uma Licença de atribuição Creative Commons.

Atribuição-NãoComercial-SemDerivações 4.0 Internacional (CC-BY-NC-ND).

GRADUS EDITORA – Todos os Direitos Reservados – 2023  
Rua Luiz Gama, 229. Vila Independência. Bauru, São Paulo. Brasil.  
[www.GRADUSEDITORA.com](http://www.GRADUSEDITORA.com)

Este libro es resultado de una investigación científica.  
Antes de ser publicado fue revisado por pares académicos externos.

Editor-chefe: Lucas Almeida Dias  
Registro e indexação: Gradus Editora | Câmara brasileira do livro | CrossRef  
Capa: Bruno Eustáquio  
Diagramação: Bruno Eustáquio

Idioma: Espanhol

Comitê editorial científico – Gradus Editora  
Prof. Dr. Douglas M. A. de A. P. dos Santos  
Profa. Dra. Cintya de Oliveira Souza  
Profa. Dra. Ana Cláudia Bortolozzi  
Profa. Dra. Andreia de B. Machado  
Profa. Dra. Manuela Costa Melo  
Prof. Dr. Carlos Gomes de Castro  
Profa. Dra. Ana Beatriz D. Vieira  
Profa. Dra. Janaína Muniz Pícolo  
Dr. Yan Corrêa Rodrigues  
Prof. Dr. Thiago Henrique Omena  
Prof. Dr. Luís Rafael Araújo Corrêa  
Prof. Dr. Fábio Roger Vasconcelos  
Prof. Dr. Leandro A. dos Santos  
Prof. Dr. Gustavo Schmitt  
Prof. Dra. Renata Cristina L. Andrade  
Profa. Dra. Daniela Marques Sacaro  
Profa. Dra. Gladys del C. M. Morales  
Profa. Dra. Márcia Lopes Reis

# Contenido

## Capítulo I

<b>Comportamiento sísmico geotécnico .....</b>	<b>21</b>
1.1 Comportamiento sísmico geotécnico .....	23
1.2 Modelos dinámicos .....	24
1.3 Evaluación geotécnica .....	25
1.4 Análisis sísmico: estático y dinámico .....	26
1.5 Análisis por elementos finitos .....	27

## Capítulo II

<b>Depósitos de relave .....</b>	<b>29</b>
2.1 ¿Qué son los relaves? .....	30
2.2. Depósitos de relave.....	31
2.3. Tipos de depósitos de relave.....	32
2.4. Depósitos de relaves: estabilidad física y química .....	35
2.5. Evaluación de respuestas sísmicas para los depósitos de relave .....	36

## Capítulo III

<b>Depósitos de relave en abandono en Ticapampa, río Santa: caracterización geotécnica .....</b>	<b>39</b>
--	-----------

## Capítulo IV

<b>Evaluación bidimensional del comportamiento sísmico geotécnico de estabilidad de los depósitos de relave en abandono en Ticapampa, río Santa .....</b>	<b>71</b>
---	-----------

## Capítulo V

<b>Fuerzas sísmicas y los depósitos de relave .....</b>	<b>119</b>
5.1. Respuestas sísmicas y dinámicas en estructuras geotécnicas .....	120
5.2. Importancia del programa Quake/W en el análisis dinámico .....	120
<b>Referencias bibliográficas .....</b>	<b>127</b>
<b>Datos de los autores .....</b>	<b>133</b>



# Índice de tablas

<b>Tabla 1</b> <i>Aceleraciones sísmicas máximas esperadas, para diversos períodos de retorno en el área de estudio</i> .....	46
<b>Tabla 2</b> <i>Datos del evento sísmico seleccionado para el análisis dinámico</i> .....	51
<b>Tabla 3</b> <i>Parámetros geotécnicos para la sección crítica analizada (Perfil 1-1)</i> .....	61
<b>Tabla 4</b> <i>Parámetros geotécnicos y dinámicos de la sección crítica (Perfil 1-1)</i> .....	63





# Índice de figuras

<b>Figura 1</b> Localización de la zona de estudio (Dirección General de Asuntos Ambientales, Ministerio de Energía y Minas).....	38
<b>Figura 2</b> Imagen Satelital de los depósitos de relave de Ticapampa (Google Earth).....	39
<b>Figura 3</b> Fotografía que muestra una vista general de los depósitos de relave de Ticapampa.....	39
<b>Figura 4</b> Vista general de los depósitos de relave de Ticapampa (Google Earth).....	40
<b>Figura 5</b> Topografía de los depósitos de relave de Ticapampa.....	40
<b>Figura 6</b> Geología regional de la zona de estudio (Ingemmet).....	41
<b>Figura 7</b> Geología local de la zona de estudio (Ingemmet).....	42
<b>Figura 8</b> Mapa de isoaceleraciones, para un periodo de retorno de 475 años, con una probabilidad de excedencia del 10%.....	46
<b>Figura 9</b> Mapa de riesgo sísmico del Perú. Aceleración pico del terreno ( $m/s^2$ ) con 10 % de excedencia en 50 años.....	47
<b>Figura 10</b> Mapa de densidad sísmica del Perú. Número de sismos por año, de magnitud 5 o mayor, a todas las profundidades.....	48
<b>Figura 11</b> Mapa de riesgo sísmico del Perú. Aceleración pico del terreno ( $m/s^2$ ) con 10 % de excedencia en 50 años.....	48
<b>Figura 12</b> Mapa del sismo del 31-05-1970 en Áncash-Perú.....	49
<b>Figura 13</b> Mapa de aceleraciones pico del sismo del 31-05-1970 Áncash-Perú.....	49
<b>Figura 14</b> Mapa de intensidades del sismo del 31-05-1970 Áncash-Perú.....	50
<b>Figura 15</b> Acelerograma del sismo del 31-05-1970 E-O (CISMID).....	50
<b>Figura 16</b> Archivo de aceleración estándar PQR-700531 1523 del sismo del 31-05-1970 (CISMID).....	51
<b>Figura 17</b> Archivo tipo ACC y acelerograma del sismo 31-05-1970 E-O 30s para el análisis dinámico con el Quake/W.....	52
<b>Figura 18</b> Fotografía que muestra el estado actual de los materiales que existen en los depósitos de relave en abandono en Ticapampa.....	53
<b>Figura 19</b> Ensayo de penetración estándar (SPT), realizada en la ubicación SC-1 del perfil 1-1 (Sección crítica de estudio).....	54
<b>Figura 20</b> Otra vista del ensayo de penetración estándar (SPT).....	55
<b>Figura 21</b> Perfil geosísmico de refracción sísmica-depósitos de relave en abandono de Ticapampa, realizado en el Perfil 1-1 (Sección crítica de análisis).....	55

<b>Figura 22</b> Fotografías que muestran la zona crítica del talud considerado para el análisis de la presente investigación, así como la costra de relave grueso oxidado .....	57
<b>Figura 23</b> Levantamiento secuencial de terraplén de relave por el método de disposición aguas arriba .....	58
<b>Figura 24</b> Perfil estratigráfico en la sección crítica (Perfil 1-1) del talud de los depósitos de relave en abandono de Ticapampa.....	59
<b>Figura 25</b> Ángulo de fricción de arenas en función del valor N del SPT.....	60
<b>Figura 26</b> Función típica de $G_{máx}$ , obtenido para el análisis dinámico mediante el uso del programa Quake/W para el estrato de material de relave grueso SM con $IP=0$ .....	64
<b>Figura 27</b> Función típica de $G_{máx}$ , obtenido para el análisis dinámico mediante el uso del programa Quake/W para el estrato de material de relave fino CL-ML con $IP=7$ .....	64
<b>Figura 28</b> Función de reducción de G, obtenido para el análisis dinámico mediante el uso del programa Quake/W para el estrato de material de relave grueso SM con $IP=0$ .....	65
<b>Figura 29</b> Función de reducción de G, obtenido para el análisis dinámico mediante el uso del programa Quake/W para el estrato de material de relave fino CL-ML con $IP=7$ .....	65
<b>Figura 30</b> Función de amortiguamiento, obtenido para el análisis dinámico mediante el uso del programa Quake/W para el estrato de material de relave grueso SM con $IP=0$ .....	66
<b>Figura 31</b> Función de amortiguamiento, obtenido para el análisis dinámico mediante el uso del programa Quake/W para el estrato de material de relave fino CL-ML con $IP=7$ .....	66
<b>Figura 32</b> Función de la relación de presión de poros ( $ru$ ), obtenido para el estrato de material de relave grueso SM con $IP=0$ .....	67
<b>Figura 33</b> Función de la relación de presión de poros ( $ru$ ), obtenido para el estrato de material de relave fino CL-ML con $IP=7$ .....	67
<b>Figura 34</b> Función de número cíclico y relación de corte cíclico CSR, obtenido para el estrato de material de relave grueso SM con $IP=0$ .....	68
<b>Figura 35</b> Función de número cíclico y relación de corte cíclico CSR, obtenido para el estrato de material de relave fino CL-ML con $IP=7$ .....	68
<b>Figura 36</b> Representación esquemática de la evaluación de la sección crítica, siguiendo una metodología analítica.....	70
<b>Figura 37</b> Modelamiento geométrico en el Quake/W 2007, de la sección crítica (Perfil 1-1) analizada para los Depósitos de Relave en Ticapampa.....	71
<b>Figura 38</b> Ingreso de parámetros geotécnicos y dinámicos al modelamiento geométrico en el Quake/W 2007, de los estratos de la sección crítica (Perfil 1-1) .....	72
<b>Figura 39</b> Presión de poro del agua del análisis estático inicial en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	79

<b>Figura 40</b> Esfuerzos verticales totales del análisis estático inicial en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	79
<b>Figura 41</b> Esfuerzos efectivos del análisis estático inicial en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	80
<b>Figura 42</b> Registro sísmico de aceleraciones del sismo del 31-05-1970 E-O 30s escalado a la aceleración de 0.35 g.....	80
<b>Figura 43</b> Convergencia de análisis dinámico con Quake/W 2007 en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa-río Santa .....	<b>81</b>
<b>Figura 44</b> Propiedades dinámicas- $g_{máx}$ , del análisis dinámico en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	82
<b>Figura 45</b> Propiedades dinámicas-G (equivalente), del análisis dinámico en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa .....	82
<b>Figura 46</b> Propiedades dinámicas-relación de Poisson, del análisis dinámico en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	83
<b>Figura 47</b> Propiedades dinámicas-relación de amortiguamiento, del análisis dinámico en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa .....	83
<b>Figura 48</b> Presión de poros del agua del análisis dinámico en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	84
<b>Figura 49</b> Esfuerzos verticales totales del análisis dinámico en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	84
<b>Figura 50</b> Esfuerzos efectivos del análisis dinámico en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	85
<b>Figura 51</b> Desplazamientos obtenidos del análisis dinámico en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	86
<b>Figura 52</b> Desplazamiento-tiempo historia en la base de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	86
<b>Figura 53</b> Desplazamiento espectral en la base de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	87
<b>Figura 54</b> Desplazamiento-tiempo historia en la superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	87
<b>Figura 55</b> Desplazamiento espectral en la superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	88
<b>Figura 56</b> Velocidades obtenidos del análisis dinámico en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	88

<b>Figura 57</b> Velocidad-tiempo historia en la base de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	89
<b>Figura 58</b> Velocidad espectral en la base de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa .....	89
<b>Figura 59</b> Velocidad-tiempo historia en la superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	90
<b>Figura 60</b> Velocidad espectral en la superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa..	90
<b>Figura 61</b> Aceleraciones obtenidos del análisis dinámico en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	90
<b>Figura 62</b> Aceleración-tiempo historia en la base de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	91
<b>Figura 63</b> Aceleración espectral en la base de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa ...	92
<b>Figura 64</b> Aceleración-tiempo historia en la superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	92
<b>Figura 65</b> Aceleración espectral en la superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	93
<b>Figura 66</b> Comparación de aceleración tiempo historia, entre la base y la superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, para el sismo del 31-05- 1970 E-O, escalado a la aceleración de 0.35g.	93
<b>Figura 67</b> Comparación de espectros de respuesta, en la base y superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, para el sismo del 31-05-1970 E-O, escalado a la aceleración de 0.35g.....	94
<b>Figura 68</b> Coeficiente espectral entre la base y superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, para el sismo del 31-05-1970 E-O, escalado a la aceleración de 0.35g.....	95
<b>Figura 69</b> Resultados obtenidos de CSR (relación de esfuerzo cíclico) para análisis de licuación, en la sección crítica de los depósitos de relave .....	96
<b>Figura 70</b> Desplazamiento en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, para un tiempo de 0.2 s .....	96
<b>Figura 71</b> Desplazamiento en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, para un tiempo de 9.4 s .....	97
<b>Figura 72</b> Desplazamiento en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, para un tiempo de 30.0 s.....	97
<b>Figura 73</b> Desplazamientos laterales relativos a la base fija en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	98

<b>Figura 74</b> Esfuerzo de corte máximo del análisis sísmico bidimensional en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa .....	98
<b>Figura 75</b> Análisis de estabilidad de taludes post-sismo en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, bajo el efecto del sismo del 31-05-1970 E-O, escalado a la aceleración de 0.35g.....	99
<b>Figura 76</b> $FS=0.985$ para el tiempo de 30.0seg, del análisis de estabilidad de taludes post-sismo en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, bajo el efecto del sismo del 31-05-1970 E-O, escalado a la aceleración de 0.35g.....	100
<b>Figura 77</b> Factor de seguridad vs. tiempo, del análisis de estabilidad de taludes post-sismo en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, bajo el efecto del Sismo del 31-05-1970 E-O, escalado a la aceleración de 0.35 g .....	100
<b>Figura 78</b> Resultado de factor de seguridad vs. tiempo, del análisis de estabilidad de taludes post-sismo en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, bajo el efecto del Sismo del 31-05-1970 E-O, escalado a la aceleración de 0.35 g.....	101
<b>Figura 79</b> Deformación vs. tiempo (deformación permanente en cm, estimado por la teoría de Newmark), del análisis de estabilidad de taludes post-sismo en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, bajo el efecto del sismo del 31-05-1970 E-O, escalado a la aceleración de 0.35g .....	101
<b>Figura 80</b> Resultado de deformación vs. tiempo (deformación permanente en cm, estimado por la teoría de Newmark), del análisis de estabilidad de taludes post-sismo en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, bajo el efecto del Sismo del 31-05-1970 E-O, escalado a la aceleración de 0.35g.....	102
<b>Figura 81</b> Sección crítica estabilizada de los depósitos de relave en Ticapampa.....	104
<b>Figura 82</b> Modelamiento geométrico en el Quake/W 2007, en condición estabilizada en la sección crítica para los depósitos de relave en Ticapampa.....	104
<b>Figura 83</b> Esfuerzos efectivos del análisis estático inicial en la condición estabilizada de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	105
<b>Figura 84</b> Propiedades dinámicas- $Gm_{\max}$ , del análisis dinámico en la condición estabilizada de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa .....	106
<b>Figura 85</b> Propiedades Dinámicas-G (equivalente), de análisis dinámico en la condición estabilizada de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa .....	106
<b>Figura 86</b> Esfuerzos efectivos del análisis dinámico en la condición estabilizada de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	107
<b>Figura 87</b> Desplazamientos obtenidos del análisis dinámico en la condición estabilizada de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	107
<b>Figura 88</b> Velocidades obtenidas del análisis dinámico en la condición estabilizada de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.....	108

<b>Figura 89</b> <i>Aceleraciones obtenidas del análisis dinámico en la condición estabilizada de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa</i> .....	108
<b>Figura 90</b> <i>Esfuerzo de corte máximo del análisis dinámico en la condición estabilizada de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa</i> .....	109
<b>Figura 91</b> <i>FS=1.513 para el tiempo de 30.0 s, del análisis de estabilidad de taludes post-sismo en la condición estabilizada en los depósitos de relave en Ticapampa</i> .....	110
<b>Figura 92</b> <i>Resultado de deformación vs. tiempo (deformación permanente en cm, estimado por la teoría de Newmark), del análisis de estabilidad de taludes post-sismo en la condición estabilizada en los depósitos de relave en Ticapampa</i> .....	110

Los depósitos de relave son estructuras geotécnicas utilizadas en la industria minera para almacenar los residuos generados. Estos depósitos pueden experimentar desplazamientos, deformaciones y vibraciones durante eventos sísmicos, lo que pone en riesgo su estabilidad. Por lo tanto, es esencial realizar un análisis exhaustivo de su comportamiento sísmico bidimensional, considerando las propiedades del material de relave y su interacción con el suelo circundante. Este análisis proporciona información crucial para diseñar y aplicar medidas de mitigación adecuadas, con el objetivo de garantizar la seguridad y estabilidad de los depósitos de relave frente a terremotos. Los resultados del análisis dinámico sísmico con el programa Quake/W permiten cuantificar las magnitudes del comportamiento sísmico geotécnico de los depósitos de relave, incluyendo deformaciones y desplazamientos máximos. Estas deformaciones son desfavorables en la condición actual, lo que indica la inestabilidad y falla de los depósitos de relave abandonados en Ticapampa, río Santa. Sin embargo, al considerar la condición estabilizada propuesta como alternativa de solución, se logra minimizar estas deformaciones y alcanzar la estabilidad física de los depósitos de relave frente a eventos sísmicos.

**Palabras clave:** depósitos, relave, estructura geotécnica, comportamiento sísmico, desplazamientos, seguridad





## Abstract

Tailings dams are geotechnical structures used in the mining industry to store tailings. These deposits can experience displacements, deformations and vibrations during seismic events, which puts their stability at risk. Therefore, it is essential to perform a thorough analysis of their two-dimensional seismic behavior, considering the properties of the tailings material and its interaction with the surrounding soil. This analysis provides crucial information for designing and implementing appropriate mitigation measures to ensure the safety and stability of tailings deposits in the event of earthquakes. The results of the dynamic seismic analysis with the Quake/W program allow the quantification of the magnitudes of the geotechnical seismic behavior of the tailings deposits, including maximum deformations and displacements. These deformations are unfavorable in the current condition, indicating instability and failure of the abandoned tailings deposits at Ticapampa, Santa river. However, by considering the proposed stabilized condition as an alternative solution, it is possible to minimize these deformations and achieve physical stability of the tailings deposits against seismic events.

**Keywords:** deposits, tailings, geotechnical structure, seismic behavior, displacements, safety



Los depósitos de relave son estructuras geotécnicas utilizadas para almacenar los residuos generados por la industria minera (Sánchez *et al.*, 2022). Estos depósitos presentan un comportamiento sísmico geotécnico que debe ser evaluado y comprendido desde una perspectiva bidimensional. Durante un evento sísmico, los depósitos de relave pueden experimentar desplazamientos, deformaciones y vibraciones que pueden comprometer su estabilidad. Por lo tanto, es fundamental realizar un análisis exhaustivo para evaluar la respuesta sísmica de estos depósitos, considerando tanto las características del material de relave como la interacción con el suelo circundante. El entendimiento de este comportamiento sísmico bidimensional es crucial para el diseño y la implementación de medidas de mitigación adecuadas, que garanticen la seguridad y estabilidad de los depósitos de relave frente a eventos sísmicos (Pinedo y Soto, 2022).

En el primer capítulo se abordan los conocimientos sobre el comportamiento sísmico geotécnico, considerando su descripción. Así como también, se detalla en relación con los modelos dinámicos, la evaluación geotécnica, el análisis sísmico —tanto estático como dinámico— y el análisis por elementos finitos. De manera seguida, en el segundo capítulo, se realiza una conceptualización sobre los depósitos de relave. Para ello, se describen sus tipos y su categorización según la estabilidad que presente: física o química. Asimismo, se enfatiza en la evaluación de respuestas sísmicas para los depósitos de relave.

Correspondiente al tercer capítulo, se concretiza el avance de la investigación centrándose en los depósitos de relave en abandono en Ticapampa, río Santa. En tal sección, se aborda la caracterización geotécnica. Posterior a ello, en el cuarto capítulo se expone la evaluación bidimensional del comportamiento sísmico geotécnico de estabilidad de los depósitos de relave en abandono en Ticapampa, río Santa. Para concluir, el quinto capítulo presenta una descripción sobre las fuerzas sísmicas y los depósitos de relave, abordando el conocimiento de las medias oportunas en medida del uso del programa Quake/W en el análisis dinámico. El objetivo del estudio fue evaluar bidimensionalmente el comportamiento sísmico geotécnico de los depósitos de relave en abandono en Ticapampa, río Santa.





Capítulo I

**Comportamiento  
sísmico geotécnico**

El análisis sísmico, en particular, en el contexto del comportamiento sísmico geotécnico, es un proceso complejo que se lleva a cabo mediante un enfoque sinérgico que involucra varios elementos clave (Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento [MVCS], 2018).

En primer lugar, el comportamiento sísmico geotécnico se refiere a cómo las estructuras y los suelos interactúan durante un terremoto. Este comportamiento depende de las propiedades del suelo, como su rigidez, resistencia y capacidad de carga, así como de las características de la estructura, como su geometría, masa y resistencia. Además, también se consideran los efectos dinámicos, como las ondas sísmicas que se propagan a través del suelo y afectan tanto a la estructura como al suelo circundante (Pinedo y Soto, 2022).

Por su lado, Gutierrez (2019) sostiene que, para comprender y predecir este comportamiento, se utilizan modelos dinámicos, que son representaciones matemáticas y físicas de las estructuras y los suelos durante eventos sísmicos. Estos modelos incorporan principios de la mecánica de estructuras y la dinámica de los suelos para simular cómo responderán ante las fuerzas sísmicas. Los modelos dinámicos pueden ser simplificados o detallados, y se basan en técnicas numéricas como el método de elementos finitos para obtener resultados precisos.

La evaluación geotécnica es otro aspecto importante en el análisis sísmico. Esta evaluación implica estudiar y analizar las propiedades del suelo y cómo interactúa con las estructuras. Se consideran factores geotécnicos, como la capacidad de carga del suelo, la susceptibilidad a la licuefacción y la estabilidad de taludes, para comprender cómo estas características influirán en la respuesta sísmica de las estructuras (Hernández *et al.*, 2022).

En cuanto al análisis sísmico propiamente dicho, el MVCS (2018) ha determinado que se emplean dos enfoques principales: el análisis sísmico estático y el análisis sísmico dinámico. El análisis sísmico estático considera el efecto sísmico como una fuerza estática equivalente, mientras que el análisis sísmico dinámico tiene en cuenta la respuesta dinámica completa de la estructura ante el movimiento sísmico. Ambos enfoques tienen sus ventajas y se utilizan según la complejidad de la estructura y la magnitud de las fuerzas sísmicas.

En este contexto, Coronel (2021) plantea que el análisis por elementos finitos desempeña un papel fundamental. Esta técnica numérica se utiliza para discretizar el dominio en una malla de elementos finitos y aproximar las ecuaciones que describen el comportamiento de la estructura y el suelo. Con el análisis por elementos finitos, se pueden obtener resultados detallados y precisos sobre las deformaciones, tensiones y desplazamientos en la estructura y el suelo durante un evento sísmico, lo que contribuye a una mejor comprensión y diseño de las estructuras frente a cargas sísmicas.

En resumen, el análisis sísmico, en el contexto del comportamiento sísmico geotécnico, involucra el estudio sinérgico del comportamiento de las estructuras y los suelos durante eventos sísmicos. Esto implica el uso de modelos dinámicos, la evaluación geotécnica, el análisis sísmico estático y dinámico, y la aplicación de técnicas como el análisis por elementos finitos. Estos elementos trabajan en conjunto para proporcionar una comprensión más completa y precisa del comportamiento sísmico y contribuir a un diseño seguro y eficiente de las estructuras en áreas propensas a los terremotos.

## 1.1 Comportamiento sísmico geotécnico

El comportamiento sísmico geotécnico se refiere al estudio del comportamiento de los suelos y las interacciones suelo-estructura durante un evento sísmico o terremoto. Es una rama especializada de la ingeniería geotécnica que se centra en comprender cómo los suelos responden a las fuerzas sísmicas y cómo esto puede afectar la estabilidad de las estructuras sobre ellos (Pinedo y Soto, 2022).

De acuerdo con Reyes *et al.* (2020), durante un terremoto, las ondas sísmicas generadas se propagan a través del suelo y causan vibraciones y deformaciones en el terreno. El comportamiento sísmico geotécnico se ocupa de analizar y predecir cómo estos movimientos sísmicos afectan a los suelos, incluyendo su respuesta dinámica, deformaciones, asentamientos, licuefacción, deslizamientos de tierra, entre otros fenómenos geotécnicos asociados.

Algunas de las características y aspectos clave del comportamiento sísmico geotécnico son los siguientes:

- a. Amplificación del suelo.** Para Lizarazo *et al.* (2020), durante un terremoto, las ondas sísmicas viajan a través del suelo y pueden amplificarse en ciertas condiciones. La amplificación del suelo se produce debido a la variación de las propiedades del suelo, como la rigidez y la densidad, a diferentes profundidades. Esta amplificación puede aumentar significativamente la intensidad de las ondas sísmicas en comparación con la intensidad del terremoto original, lo que puede tener efectos adversos en las estructuras construidas sobre el suelo.
- b. Licuefacción.** Desde la perspectiva de Verdugo y González (2019), la licuefacción es un fenómeno geotécnico que ocurre en suelos saturados no cohesivos durante un terremoto. Durante este evento sísmico, la presión del agua intersticial aumenta en el suelo, lo que provoca una disminución en su resistencia y rigidez. Como resultado, el suelo se comporta temporalmente como un líquido, lo que puede llevar a asentamientos, deformaciones y fallas en las estructuras construidas sobre él. La licuefacción se evalúa y analiza mediante técnicas geotécnicas para predecir su susceptibilidad y diseñar medidas de mitigación. Estas medidas incluyen la compactación del suelo, la mejora de la drenabilidad y la construcción de estructuras antisísmicas. La comprensión de la licuefacción es esencial para garantizar la seguridad de las construcciones en áreas propensas a terremotos.
- c. Deformación del suelo.** Se refiere a los cambios físicos y geométricos que experimenta el suelo durante un terremoto. Esto incluye asentamientos, deslizamientos, deformaciones laterales y cambios volumétricos. Estas deformaciones pueden tener un impacto significativo en la estabilidad de las estructuras construidas sobre el suelo. La evaluación de la deformación del suelo es importante para el diseño y la mitigación de riesgos, y se utilizan técnicas de análisis geotécnico para predecir y comprender estos cambios. Esto garantiza la seguridad de las estructuras y ayuda a tomar decisiones informadas durante el diseño sísmico (Chamorro-Zurita y Fernández-Lavín, 2022).
- d. Falla de las estructuras.** El comportamiento sísmico geotécnico también se enfoca en el análisis de la respuesta de las estructuras frente a un terremoto. Esto implica evaluar la capacidad de las estructuras para resistir las fuerzas sísmicas y prevenir el colapso. Las características geotécnicas del suelo en el que se construyen las estructuras desempeñan un papel fundamental en su comportamiento sísmico, ya que pueden influir en la transmisión de las fuerzas sísmicas a la

estructura y en la capacidad del suelo para proporcionar soporte y estabilidad (Camacho-Garita *et al.*, 2019).

En resumen, el comportamiento sísmico geotécnico es un campo de estudio interdisciplinario que analiza cómo los suelos y las rocas responden a los terremotos. La comprensión de las características y los aspectos de este comportamiento es crucial para el diseño y la construcción de estructuras resistentes a los sismos, y para garantizar la seguridad de las personas en áreas propensas a terremotos.

## 1.2 Modelos dinámicos

Conforme con Gutierrez (2019), los modelos dinámicos son herramientas fundamentales en el estudio del comportamiento sísmico geotécnico. Estos modelos se utilizan para simular y predecir cómo los suelos y las estructuras responden a las cargas sísmicas. En general, los modelos dinámicos se basan en la teoría de la mecánica de suelos y utilizan principios de la dinámica de estructuras para analizar el comportamiento de los materiales y las interacciones entre el suelo y la estructura durante un terremoto.

A su vez, Leal y Fermandois (2019) sostienen que, en el comportamiento sísmico geotécnico, existen diferentes tipos de modelos dinámicos que se utilizan dependiendo de los objetivos del estudio. Entre ellos, se encuentran los modelos de elementos finitos, que discretizan el suelo y la estructura en elementos pequeños y calculan las respuestas dinámicas en cada uno de ellos. Estos modelos permiten obtener información detallada sobre el comportamiento localizado del suelo y las estructuras, pero pueden requerir un tiempo computacional considerable debido a su complejidad. Otro tipo de modelos dinámicos utilizados son los modelos simplificados, como el modelo de masa-resorte, que representan el suelo y la estructura como masas conectadas por resortes y amortiguadores. Estos modelos son más simples y computacionalmente más eficientes, pero proporcionan resultados menos precisos en comparación con los modelos de elementos finitos (Tena, 2019).

Además, Gutierrez (2019) resalta que los modelos dinámicos también consideran la incorporación de parámetros de suelo, como la rigidez, la amortiguación y la capacidad de carga, que son esenciales para comprender el comportamiento sísmico geotécnico. Estos parámetros pueden obtenerse a través de pruebas de laboratorio, ensayos de campo y correlaciones empíricas, y se introducen en los modelos para reflejar las propiedades del suelo y su respuesta ante las cargas sísmicas. Los modelos dinámicos en el comportamiento sísmico geotécnico se utilizan para realizar estudios de respuesta sísmica, análisis de amplificación del suelo, evaluación de licuefacción y deformación del suelo, entre otros. Estos modelos permiten evaluar la seguridad y el comportamiento de las estructuras bajo diferentes condiciones sísmicas y ayudan en el diseño de medidas de mitigación y refuerzo.

Es importante destacar que los modelos dinámicos en el comportamiento sísmico geotécnico son herramientas complementarias a los estudios de campo y las observaciones de terremotos reales. Los datos recopilados de eventos sísmicos pasados son fundamentales para validar y calibrar los modelos y mejorar su precisión en la predicción del comportamiento del suelo y las estructuras durante un terremoto (Salvador, 2020).

En conclusión, los modelos dinámicos desempeñan un papel crucial en el estudio del comportamiento sísmico geotécnico. Estas herramientas permiten simular y predecir las respuestas



del suelo y las estructuras durante un terremoto, proporcionando información invaluable para el diseño de estructuras resistentes a los sismos y la evaluación de la seguridad de las construcciones en áreas propensas a terremotos.

### 1.3 Evaluación geotécnica

Para autores como Carlos (2022), la evaluación geotécnica es un proceso fundamental en la ingeniería geotécnica que tiene como objetivo comprender las características del suelo y las rocas en un sitio específico. Esta evaluación se realiza para determinar las propiedades geotécnicas del terreno y utilizar esta información en el diseño y la construcción de proyectos de ingeniería, como cimentaciones, estructuras de contención y obras de estabilización. El proceso de evaluación geotécnica involucra una serie de etapas. En primer lugar, se recopila información geológica y geofísica del área de estudio, lo que incluye la identificación de los tipos de suelo presentes, la estratigrafía y las características de las rocas subyacentes. Esta información es esencial para comprender la formación geológica y el comportamiento del suelo en el sitio.

A continuación, se realizan pruebas de campo y de laboratorio para obtener datos sobre las propiedades físicas y mecánicas del suelo. Esto incluye pruebas de compactación, ensayos de permeabilidad, ensayos de consolidación, ensayos de resistencia y otros ensayos específicos según las necesidades del proyecto. Estas pruebas proporcionan información sobre la capacidad de carga del suelo, su compresibilidad, su resistencia y su permeabilidad, entre otros parámetros (Hernández *et al.*, 2022).

Además de las pruebas geotécnicas, Vega (2022) postula que la evaluación geotécnica también puede incluir estudios geofísicos, como la sísmica de refracción, la tomografía eléctrica o la prueba de penetración estándar (SPT). Estos estudios proporcionan información adicional sobre la estructura y las propiedades del subsuelo, y pueden ayudar a identificar capas de suelo de diferentes características y a evaluar la presencia de agua subterránea.

Una vez recopilados los datos, se realiza un análisis e interpretación de la información geotécnica. Esto implica la elaboración de perfiles geotécnicos y la identificación de las características y los parámetros del suelo relevantes para el proyecto. Se evalúan aspectos como la capacidad de carga del suelo, la estabilidad de taludes, la posibilidad de licuefacción o la susceptibilidad a la erosión. Con base en los resultados de la evaluación geotécnica, se toman decisiones de diseño y construcción. Se seleccionan las cimentaciones más adecuadas, se definen los parámetros de diseño de las estructuras y se implementan medidas de mitigación o refuerzo si es necesario. La evaluación geotécnica también es fundamental para evaluar los riesgos geotécnicos y establecer medidas de seguridad adecuadas para proteger la vida humana y los bienes durante eventos sísmicos o de otro tipo (Pinzon y Rodriguez, 2020).

En resumen, la evaluación geotécnica es un proceso esencial en la ingeniería geotécnica que implica la recopilación, análisis e interpretación de datos para comprender las características del suelo y las rocas en un sitio específico. Esta evaluación proporciona información clave para el diseño y la construcción de proyectos de ingeniería, garantizando la seguridad y la eficiencia de las estructuras y obras en el terreno.

## 1.4 Análisis sísmico: estático y dinámico

El análisis sísmico es un proceso que se lleva a cabo en el campo de la ingeniería estructural para evaluar el comportamiento de una estructura ante las fuerzas y deformaciones generadas por los terremotos o movimientos sísmicos. Su objetivo principal es garantizar que la estructura sea capaz de resistir las cargas sísmicas y mantener la seguridad de las personas que la ocupan (MVCS, 2018).

Según Juárez y Ortiz (2021), durante el análisis sísmico se aplican principios de la mecánica de estructuras y se utilizan métodos y modelos matemáticos para determinar las respuestas y comportamientos de la estructura bajo diferentes escenarios sísmicos. El análisis tiene en cuenta factores como la rigidez, la masa, la geometría, la distribución de cargas, las características del suelo y las propiedades de los materiales de construcción. El análisis sísmico implica el cálculo de las fuerzas y momentos sísmicos que actúan sobre la estructura, así como las deformaciones y desplazamientos resultantes. También puede evaluar la capacidad de la estructura para soportar las cargas sísmicas, identificar posibles puntos débiles y determinar si se requiere algún tipo de refuerzo estructural. En general, el análisis sísmico se lleva a cabo en etapas de diseño y evaluación de estructuras, ya sea para nuevas construcciones o para evaluar la resistencia sísmica de estructuras existentes. Los resultados del análisis sísmico son fundamentales para la toma de decisiones en el diseño de estructuras y para asegurar que cumplan con los códigos y estándares de seguridad establecidos.

De acuerdo con el MVCS (2018), existen dos tipos principales de análisis sísmico: estático y dinámico. A continuación, se describe cada uno de ellos:

- a. Análisis sísmico estático.** En este tipo de análisis, se considera el efecto sísmico como una fuerza estática equivalente aplicada a la estructura. Se basa en la suposición de que las inercias y aceleraciones generadas por el movimiento sísmico son proporcionales a las fuerzas y deformaciones estáticas. El análisis sísmico estático es más sencillo y rápido de realizar que el análisis sísmico dinámico, pero, generalmente, se utiliza para estructuras simples o cuando las fuerzas sísmicas son relativamente pequeñas. Este enfoque no considera la respuesta dinámica real de la estructura y no proporciona información detallada sobre las aceleraciones y velocidades generadas durante el terremoto (Rojas y Riveros, 2020).
- b. Análisis sísmico dinámico.** Este tipo de análisis tiene en cuenta la respuesta dinámica completa de la estructura ante el movimiento sísmico. En lugar de considerar el terremoto como una fuerza estática, se modela la estructura como un sistema vibratorio y se utiliza la teoría de la dinámica estructural para determinar las aceleraciones, velocidades y desplazamientos en cada punto de la estructura en función del tiempo. Se utilizan ecuaciones de equilibrio dinámico y se aplican métodos numéricos, como el método de los elementos finitos, para obtener una representación precisa del comportamiento sísmico de la estructura. Este análisis proporciona información detallada sobre la respuesta dinámica de la estructura y es especialmente útil para estructuras complejas o expuestas a fuerzas sísmicas significativas (Vilca y Obregón, 2023).

En cuanto a los aspectos importantes del análisis sísmico estático y del análisis sísmico dinámico, el MVCS (2018) destaca los siguientes:

### *Aspectos importantes del análisis sísmico estático*

- **Determinación de las fuerzas sísmicas.** Se debe utilizar métodos y códigos de diseño sísmico adecuados para calcular las fuerzas estáticas equivalentes que se aplicarán a la estructura. Estos métodos pueden variar según la región sísmica y el tipo de estructura (Martínez y Nungaray, 2019).
- **Distribución de las fuerzas sísmicas.** Es necesario distribuir adecuadamente las fuerzas sísmicas a lo largo de la estructura, considerando la rigidez y la masa de los elementos estructurales (Romero y Almache, 2022).
- **Combinación con otras cargas.** Las fuerzas sísmicas se deben combinar con otras cargas estáticas y dinámicas que actúen sobre la estructura, como cargas gravitatorias o cargas debidas al viento (Labbé, 2019).

### *Aspectos importantes del análisis sísmico dinámico*

- **Selección del espectro de diseño.** Se debe determinar el espectro de respuesta elástica que representa las características del movimiento sísmico en la región donde se encuentra la estructura (Guerrero y Rojas, 2020).

## **1.5 Análisis por elementos finitos**

De acuerdo con Coronel (2021), el análisis por elementos finitos es una técnica numérica utilizada en el campo del comportamiento sísmico geotécnico para simular y predecir el comportamiento de los suelos y las estructuras durante eventos sísmicos. Se basa en la discretización de un dominio continuo en un número finito de elementos, donde se aproximan las ecuaciones diferenciales que rigen el comportamiento del suelo y las interacciones suelo-estructura. En el contexto del comportamiento sísmico geotécnico, los análisis por elementos finitos se utilizan para modelar el comportamiento de los suelos y las estructuras bajo cargas sísmicas. Estos análisis consideran la respuesta dinámica de los suelos, incluyendo la propagación de las ondas sísmicas, la interacción suelo-estructura y los efectos geotécnicos específicos durante un terremoto.

El proceso de análisis por elementos finitos en el comportamiento sísmico geotécnico implica los siguientes pasos:

- a. Discretización del dominio.** Según Álvarez *et al.* (2020), el dominio se divide en una malla de elementos finitos, que pueden ser elementos unidimensionales (1D), bidimensionales (2D) o tridimensionales (3D). Cada elemento tiene propiedades y comportamiento definidos. La discretización permite resolver las ecuaciones del problema en cada elemento mediante métodos numéricos, obteniendo soluciones aproximadas del comportamiento de manera eficiente y precisa. La discretización del dominio es un paso esencial en el análisis de elementos finitos y contribuye a una representación detallada del dominio continuo y la obtención de resultados numéricos confiables.
- b. Formulación del modelo.** Para Enríquez y Rojas (2021), se establecen las ecuaciones constitutivas, las condiciones de contorno y las hipótesis necesarias para describir el comportamiento de la estructura o el suelo en cada elemento finito. Esto implica elegir el tipo de elemento finito,

definir las ecuaciones constitutivas que relacionan las deformaciones y tensiones, y establecer las condiciones de contorno adecuadas. La formulación del modelo es crucial para obtener soluciones numéricas precisas y confiables en el análisis de elementos finitos.

- c. Asignación de las condiciones de contorno.** Se establecen las restricciones físicas o los desplazamientos conocidos en ciertos nodos o bordes del dominio de análisis. Estas condiciones son fundamentales para resolver el sistema de ecuaciones y obtener soluciones precisas del problema. Pueden incluir condiciones de desplazamiento y condiciones de carga, y deben ser consistentes con el comportamiento físico del sistema. Una asignación adecuada de las condiciones de contorno garantiza resultados confiables y realistas en el análisis de elementos finitos (Alonso, 2020).
- d. Solución numérica.** Al respecto, Mesa *et al.* (2023) sostienen que se resuelve el sistema de ecuaciones resultante de la discretización del dominio y la formulación del modelo. Se utilizan métodos y técnicas numéricas para obtener soluciones aproximadas del comportamiento de la estructura o el suelo. La solución numérica se basa en la aproximación de las variables desconocidas en cada elemento finito y se ensamblan para obtener una representación global. Es una solución aproximada y su precisión depende de la calidad de la discretización y los métodos utilizados.
- e. Evaluación de resultados.** Se refiere al proceso de analizar, interpretar y validar los resultados numéricos obtenidos del análisis. Esto implica visualizar los resultados de manera clara, verificar su precisión comparándolos con soluciones analíticas o datos experimentales, interpretar su significado en relación con los objetivos del análisis, realizar análisis de sensibilidad para evaluar la influencia de diferentes variables, y validar los resultados mediante comparaciones con datos de referencia. La evaluación de resultados es fundamental para comprender el comportamiento estructural, evaluar la seguridad y tomar decisiones informadas en el diseño o análisis de la estructura (Araya-Letelier *et al.*, 2019).

Los análisis por elementos finitos en el comportamiento sísmico geotécnico permiten obtener información detallada sobre el comportamiento del suelo y las estructuras durante eventos sísmicos, lo que ayuda en el diseño sísmico de cimentaciones, estructuras de contención, sistemas de drenaje y otras obras geotécnicas. Estos análisis proporcionan una comprensión más precisa de las respuestas y los mecanismos de falla en comparación con los enfoques analíticos tradicionales, lo que contribuye a una mejor evaluación del riesgo sísmico y a la toma de decisiones informadas en la ingeniería geotécnica.



Capítulo II

## **Depósitos de relave**

De acuerdo con Sánchez *et al.* (2022), los depósitos de relave son estructuras utilizadas para gestionar los residuos sólidos generados en la industria minera. Existen varios tipos de depósitos, como los convencionales, espesados, filtrados, en pastas y subacuáticos, que ofrecen diferentes enfoques para el almacenamiento y manejo de los relaves (Cerdeña, 2022; Martínez y Franco, 2019; Rodríguez, 2022). En este sentido, Avellaneda-Puri y Avellaneda-Cristóbal (2020) determinan que la estabilidad física y química de los depósitos es fundamental. La estabilidad física se refiere a la capacidad del depósito para mantener su integridad estructural y resistir movimientos o colapsos, mientras que la estabilidad química implica retener y contener los contaminantes químicos presentes en los relaves para minimizar su liberación y reducir el riesgo de contaminación ambiental (Zandarín, 2021).

Al respecto, Rocio (2022) detalla la evaluación de respuestas sísmicas y su necesidad para comprender cómo los depósitos de relave se comportarán ante eventos sísmicos. Esto implica analizar la interacción entre el terremoto y el depósito, considerando factores como las características sísmicas del área, la respuesta dinámica del suelo y la geometría del depósito. La evaluación ayuda a determinar la capacidad de resistencia del depósito, identificar áreas vulnerables y establecer medidas de mitigación adecuadas.

## 2.1 ¿Qué son los relaves?

Como sostienen Parodi *et al.* (2022), el relave es un término utilizado en la industria minera para referirse a los residuos sólidos que se generan durante el proceso de extracción y beneficio de minerales. Estos residuos consisten en materiales finamente molidos que quedan después de la separación del mineral valioso. El relave generalmente está compuesto por una mezcla de partículas minerales y agua, lo que le confiere una textura y apariencia similar a una pasta o lodo.

Por su lado, Brahian (2019) indica que los relaves son producidos en grandes cantidades y representan uno de los principales desafíos ambientales de la minería. Dado que contienen residuos de minerales y productos químicos utilizados en el proceso de extracción, los relaves pueden ser potencialmente tóxicos y representar un riesgo para el medio ambiente y la salud humana si no se manejan adecuadamente. La gestión de relaves es un aspecto crucial en la operación de una mina, el cual se enfoca en el almacenamiento seguro y la disposición adecuada de estos residuos. Existen diferentes métodos para gestionar los relaves, siendo los más comunes los depósitos de relaves, las presas de relaves y los relaves en pasta.

Las presas de relaves son estructuras construidas para contener los residuos en un espacio delimitado. Estas presas pueden estar compuestas por materiales naturales, como tierra y rocas, o por materiales artificiales, como geomembranas y geotextiles, que evitan la filtración de agua y el desplazamiento de los relaves. Las presas de relaves suelen ser monitoreadas de cerca para garantizar su integridad y prevenir posibles filtraciones o colapsos. Los relaves en pasta son una opción de disposición cada vez más utilizada en la industria minera. Este método consiste en mezclar los residuos con agua hasta obtener una pasta densa que se transporta y se deposita en áreas designadas. La pasta de relaves tiene la ventaja de ocupar menos espacio y reducir el riesgo de deslizamientos o colapsos en comparación con otros métodos de disposición (Huaranga *et al.*, 2021).

En resumen, el relave se refiere a los residuos sólidos generados durante la extracción y beneficio de minerales en la industria minera. Estos residuos pueden contener sustancias tóxicas y representan un desafío ambiental importante. Su gestión adecuada incluye métodos como depósitos de relaves, presas de relaves y relaves en pasta, que buscan almacenar y contener los residuos de manera segura para proteger el medio ambiente y la salud humana.

## 2.2. Depósitos de relave

Los depósitos de relave almacenan los residuos en grandes áreas delimitadas, generalmente, cercanas a la mina. Estos depósitos pueden estar diseñados para permitir que el agua se evapore y que los sólidos se asienten, reduciendo así la cantidad de agua en los relaves. Posteriormente, se cubren con materiales impermeables para prevenir la infiltración de agua y se revegetan para promover la estabilización del terreno (Sánchez *et al.*, 2022). A su vez, Emerman (2022) sostiene que los depósitos de relaves son áreas delimitadas en las que se almacenan los residuos sólidos generados durante la actividad minera. Estos depósitos se diseñan para contener los relaves de manera segura y prevenir la infiltración de agua en ellos. Típicamente, los depósitos de relaves están ubicados cerca de la mina de donde se generan los residuos.

En cuanto a su función en el comportamiento sísmico, los depósitos de relaves pueden verse afectados por los sismos debido a su ubicación y a las características de los materiales almacenados. Durante un terremoto, la vibración del suelo puede generar fuerzas y movimientos que ponen a prueba la estabilidad de los depósitos de relaves. La respuesta sísmica de un depósito de relaves depende de varios factores, como la ubicación geográfica, la geometría del depósito, la forma en que se han compactado los relaves y las propiedades geotécnicas del material. En algunos casos, los depósitos de relaves pueden experimentar deslizamientos, licuefacción o incluso colapsos parciales o completos como consecuencia de un sismo (Boada *et al.*, 2021).

Para Monje y Suazo (2019), garantizar un comportamiento sísmico seguro de los depósitos de relaves es fundamental; por ende, se realizan estudios geotécnicos y estructurales exhaustivos durante el diseño y la construcción. Estos estudios evalúan la estabilidad de los depósitos ante distintas condiciones sísmicas y proporcionan recomendaciones para fortalecer su estructura.

En cuanto a los aportes, los depósitos de relaves bien diseñados y construidos pueden contribuir a mitigar los efectos sísmicos. Algunas de las medidas implementadas para mejorar su comportamiento sísmico incluyen la construcción de taludes con pendientes adecuadas, la compactación y consolidación de los relaves, y el uso de materiales de revestimiento impermeables para evitar la infiltración de agua. Además, los depósitos de relaves pueden actuar como una barrera que absorbe parte de la energía sísmica, reduciendo así la transmisión de ondas sísmicas a zonas más alejadas y protegiendo las áreas circundantes. Esta función puede contribuir a proteger infraestructuras críticas cercanas, como viviendas, carreteras o cursos de agua (Silva-Contreras y Ochoa-Cornejo, 2022).

Asimismo, los depósitos de relave presentan diferentes tipos, Aliaga (2022) detalla los siguientes:

- Depósitos convencionales
- Depósitos de relaves espesados

- Depósitos filtrados
- Depósitos de relave en pastas
- Depósitos subacuáticos

Cada tipo de depósito de relaves tiene sus propias ventajas y desventajas, y la elección del método adecuado depende de diversos factores, como las características del mineral, la topografía del terreno, la disponibilidad de agua y los requisitos ambientales y de seguridad establecidos por las regulaciones (Aliaga, 2022).

En resumen, los depósitos de relaves son áreas designadas para almacenar los residuos sólidos generados en la actividad minera. Su función en el comportamiento sísmico implica ser diseñados y construidos de manera adecuada para resistir los efectos de los terremotos. Con medidas adecuadas, los depósitos de relaves pueden ayudar a mitigar los impactos sísmicos y proteger tanto el entorno circundante como las infraestructuras cercanas.

### 2.3. Tipos de depósitos de relave

Como bien se indicó, los depósitos de relave son de diferentes tipos. Entre los más comunes se destacan los siguientes:

#### *Depósitos convencionales*

Estos depósitos se caracterizan por ser áreas delimitadas donde se depositan los residuos sólidos resultantes del proceso de extracción y beneficio de minerales. En un depósito residual convencional, los relaves se descargan directamente en el área designada, sin un proceso de filtración o tratamiento adicional. Por lo general, se construyen en terrenos adecuados para retener los residuos de manera segura, teniendo en cuenta aspectos como la topografía, la estabilidad del suelo y la impermeabilidad del terreno circundante (Cerde, 2022).

A su vez, Moreno (2023) sostiene que los depósitos residuales convencionales suelen tener una forma cónica o en terrazas. Esta configuración permite aprovechar la gravedad para que los relaves se asienten y se separen del agua residual. El agua liberada por los relaves generalmente se drena a través de canales o sistemas de drenaje, mientras que los sólidos se acumulan en el depósito. Sin embargo, es importante tener en cuenta que los depósitos residuales convencionales presentan ciertos desafíos y riesgos asociados. La principal preocupación es la posible filtración de agua a través de los relaves, lo que podría contaminar los recursos hídricos subterráneos y superficiales cercanos. Para abordar este problema, se pueden implementar medidas de revestimiento impermeable en el fondo y las paredes del depósito para prevenir la infiltración.

Además, Araya *et al.* (2019) señalan que los depósitos residuales convencionales pueden ocupar grandes áreas de terreno y requerir una gestión cuidadosa para garantizar la estabilidad del depósito y prevenir posibles deslizamientos o colapsos. También es necesario llevar a cabo monitoreos regulares para evaluar la estabilidad del depósito y tomar medidas preventivas si se detectan signos de inestabilidad.



### *Depósitos de relaves espesados*

Al respecto, Martínez y Franco (2019) determinan que los depósitos de relaves espesados son un tipo de almacenamiento de residuos sólidos utilizado en la industria minera. En este método, se aplica un proceso de espesamiento a los relaves para reducir la cantidad de agua contenida en ellos y obtener una mezcla más concentrada de sólidos. El objetivo principal de los depósitos de relaves espesados es reducir el volumen de agua en los relaves, lo que facilita su manejo y minimiza los riesgos asociados con la infiltración de agua en el depósito. Esto se logra mediante la adición de agentes floculantes, que promueven la aglomeración y sedimentación de las partículas finas presentes en los relaves.

El proceso de espesamiento implica la alimentación de los relaves en un espesador, que es una estructura diseñada para promover la separación de los sólidos y el agua. En el espesador, los floculantes se mezclan con los relaves, lo que provoca la formación de agregados más grandes y pesados. Estos agregados se sedimentan en el fondo del espesador, mientras que el agua clarificada se libera en la parte superior (Araya *et al.*, 2019).

De acuerdo con la División El Teniente-Codelco (2020), una vez que los relaves han pasado por el proceso de espesamiento, se depositan en un área designada para su almacenamiento. El resultado es una mezcla más espesa y concentrada de sólidos, lo que reduce significativamente el volumen de agua que debe ser almacenada en el depósito. Esto tiene ventajas en términos de eficiencia en el uso del espacio y en la reducción del riesgo de infiltración de agua y la generación de lixiviados.

Además, los depósitos de relaves espesados pueden ayudar a mejorar la estabilidad del depósito. Al reducir el contenido de agua, se minimiza la presión hidrostática ejercida sobre las paredes y el fondo del depósito, lo que puede contribuir a prevenir deslizamientos o colapsos. Es importante destacar que, si bien los depósitos de relaves espesados presentan ventajas en términos de reducción del volumen de agua y mejora de la estabilidad, aún se deben tomar precauciones para prevenir la filtración de agua y garantizar la seguridad y la gestión adecuada de los residuos. Esto puede incluir el revestimiento impermeable del fondo y las paredes del depósito, así como el monitoreo regular de su comportamiento (De la Cruz y Valderrama, 2021).

### *Depósitos filtrados*

Emerman (2022) destaca que este tipo de depósito involucra un proceso de filtración para separar el agua de los residuos sólidos. En lugar de depositar los relaves directamente en un área designada, se utilizan sistemas de filtración para retener las partículas finas y permitir el paso del agua.

El proceso de depósito filtrado implica el uso de filtros y geotextiles, que son materiales porosos capaces de retener las partículas sólidas mientras permiten el flujo del agua. Los relaves son bombeados a través de estos filtros, donde las partículas más grandes se retienen en la superficie del filtro y forman una capa llamada "torta", mientras que el agua filtrada se drena a través del filtro y se recoge en canales o sistemas de drenaje. El uso de depósitos filtrados tiene varios beneficios. En primer lugar, permite obtener relaves más secos, con un menor contenido de agua, lo que facilita su manejo y transporte. Además, al separar el agua de los sólidos, se reduce significativamente el volumen de agua que debe ser almacenada en el depósito, lo que resulta en una menor demanda de espacio y una optimización de los recursos hídricos (Zandarín, 2021).

Asimismo, Meza (2022) expone que otro beneficio importante de los depósitos filtrados es la reducción del riesgo de contaminación del agua subterránea y superficial. Al retener las partículas sólidas en el filtro, se evita la liberación de sustancias potencialmente tóxicas y la generación de lixiviados contaminantes. Esto contribuye a minimizar los impactos ambientales asociados con el almacenamiento de relaves y proteger la calidad del agua. Sin embargo, es importante destacar que los depósitos filtrados requieren un mantenimiento adecuado para garantizar su eficacia y prevenir la obstrucción de los filtros. También es fundamental tener en cuenta la selección y diseño de los materiales filtrantes para garantizar la retención adecuada de las partículas y la permeabilidad del sistema.

#### *Depósitos de relaves en pasta*

Respecto con Zandarín (2021), este tipo de depósito constituye una alternativa innovadora en la industria minera para la gestión de los residuos sólidos generados durante la extracción y procesamiento de minerales. A diferencia de otros métodos de almacenamiento, los depósitos de relaves en pasta implican la mezcla de los residuos con agua hasta obtener una pasta espesa y altamente viscosa antes de su disposición final.

El proceso de formación de la pasta de relaves implica la adición controlada de agua a los residuos sólidos. El objetivo es lograr una mezcla con una alta concentración de sólidos y una consistencia similar a la de una pasta. Para alcanzar este propósito, se pueden emplear aditivos químicos, tales como polímeros o floculantes, los cuales contribuyen a mejorar la viscosidad y estabilidad de la mezcla resultante. Una vez obtenida la pasta de relaves, esta se deposita en áreas especialmente diseñadas para su almacenamiento. Estas áreas pueden consistir en cuencas impermeabilizadas o estructuras construidas con revestimientos y paredes adecuadas para retener la pasta de manera segura y confiable (Niquin, 2019).

A su vez, Morales (2021) señala que los depósitos de relaves en pasta presentan diversas ventajas en comparación con otros métodos de almacenamiento convencionales. En primer lugar, la alta viscosidad de la pasta ayuda a minimizar el escurrimiento y liberación de agua, reduciendo así el riesgo de infiltración y contaminación ambiental. Además, la mayor concentración de sólidos en la pasta permite un uso más eficiente del espacio en comparación con los depósitos convencionales o espesados.

Otro beneficio significativo es la mayor estabilidad y resistencia estructural que brindan los depósitos de relaves en pasta. La consistencia espesa y viscosa de la pasta proporciona una mayor cohesión, disminuyendo la probabilidad de deformaciones o deslizamientos, lo cual contribuye a la seguridad y confiabilidad del depósito. No obstante, es importante considerar ciertos desafíos asociados con los depósitos de relaves en pasta. La alta viscosidad de la pasta puede dificultar su manejo y transporte, lo que puede requerir equipos y sistemas especiales. Asimismo, se requiere un monitoreo y mantenimiento regular del depósito para garantizar su estabilidad y prevenir posibles problemas de filtración o colapso (Quilodrán, 2021).

#### *Depósitos subacuáticos*

Para Niquin (2019), los depósitos subacuáticos implican la disposición de los relaves en cuerpos de agua, como lagos, embalses o el mar. En lugar de depositar los relaves en tierra firme, se elige la opción de confinarlos bajo el agua. El proceso de creación de depósitos de relaves subacuáticos puede variar dependiendo de la ubicación y las características del cuerpo de agua seleccionado. En general,

implica la descarga controlada de los relaves en una zona designada dentro del cuerpo de agua, donde se espera que se sedimenten y se confinen de manera segura.

Existen diferentes métodos para la disposición de los relaves subacuáticos. Uno de los enfoques más comunes es el uso de sistemas de tuberías y bombas para transportar los relaves desde la planta de procesamiento hasta el lugar de disposición en el cuerpo de agua. Los relaves se liberan gradualmente, permitiendo que los sólidos sedimenten en el fondo mientras el agua clarificada se dispersa o se trata antes de su liberación (Vargas, 2020).

Además, Beigt *et al.* (2023) afirman que los depósitos de relaves subacuáticos ofrecen ciertas ventajas en comparación con otros métodos de almacenamiento. Una de las principales ventajas es que permiten un uso más eficiente del espacio disponible, ya que los relaves se depositan en áreas subacuáticas que pueden tener una capacidad mayor en comparación con los depósitos terrestres. Además, la disposición subacuática de los relaves puede ayudar a reducir la exposición a la superficie y, por lo tanto, la probabilidad de liberación de partículas de polvo y gases contaminantes al aire. Esto puede tener beneficios significativos para la calidad del aire y la salud de las comunidades circundantes.

Sin embargo, también existen desafíos y consideraciones asociadas con los depósitos de relaves subacuáticos. Se requiere un monitoreo y seguimiento continuo para evaluar el impacto ambiental y la estabilidad del depósito. También es importante considerar el impacto en el ecosistema acuático y tomar medidas para minimizar cualquier efecto negativo en la vida marina y los recursos naturales. Asimismo, se deben tener en cuenta las regulaciones y normativas ambientales vigentes para garantizar que los depósitos de relaves subacuáticos cumplan con los estándares de protección ambiental y de seguridad (Niquin 2019).

## 2.4. Depósitos de relaves: estabilidad física y química

Los depósitos de relaves se dividen en dos categorías principales en términos de estabilidad: estabilidad física y estabilidad química. A continuación, Avellaneda-Puri y Avellaneda-Cristóbal (2020) detallan cada una de estas categorías, así como sus aportes, ventajas y desventajas:

### *Estabilidad física de los depósitos de relaves*

La estabilidad física se refiere a la capacidad del depósito de relaves para mantener su integridad estructural y resistir los movimientos o colapsos. Esta estabilidad se logra a través de la correcta ingeniería del depósito y la consideración de factores geotécnicos (Zandarín, 2021).

Aportes y ventajas:

- La estabilidad física adecuada garantiza la seguridad de las instalaciones y del entorno circundante.
- Permite una gestión segura y confiable de los relaves a largo plazo.
- Evita problemas como deslizamientos, deformaciones o rupturas que podrían provocar la liberación de los relaves y la contaminación del medio ambiente.

Desventajas y consideraciones:

- La construcción y el mantenimiento de depósitos de relaves estables físicamente pueden requerir una inversión significativa en infraestructura y tecnología.
- Se requiere una planificación cuidadosa y monitoreo constante para garantizar la estabilidad a largo plazo y prevenir cualquier riesgo potencial.

#### *Estabilidad química de los depósitos de relaves*

La estabilidad química se refiere a la capacidad del depósito de relaves para retener y contener los contaminantes químicos presentes en los relaves, evitando su liberación y minimizando el riesgo de contaminación ambiental (Zandarín, 2021).

Aportes y ventajas:

- La estabilidad química adecuada asegura la protección del medio ambiente y de los recursos hídricos, evitando la dispersión de sustancias tóxicas o contaminantes.
- Contribuye a cumplir con las regulaciones y estándares ambientales vigentes.
- Minimiza el impacto en los ecosistemas acuáticos y terrestres circundantes.


Desventajas y consideraciones:

- El control de la estabilidad química puede requerir el uso de técnicas y tecnologías adicionales, como la encapsulación o el tratamiento de los relaves, lo que implica costos adicionales.
- Se requiere una supervisión y monitoreo continuos para asegurar que no haya filtraciones o fugas que puedan comprometer la estabilidad química.

En general, los depósitos de relaves deben buscar un equilibrio entre la estabilidad física y la estabilidad química para garantizar una gestión segura y eficiente de los residuos mineros. La correcta planificación, diseño y operación de los depósitos son fundamentales para lograr estos objetivos y minimizar los impactos ambientales. Además, es esencial cumplir con las regulaciones y normativas aplicables para garantizar la protección del medio ambiente y la seguridad de las comunidades circundantes.

## **2.5. Evaluación de respuestas sísmicas para los depósitos de relave**

De acuerdo con Rocio (2022), la evaluación de las respuestas sísmicas para los depósitos de relaves es un proceso crucial en la ingeniería de estos sistemas de almacenamiento. Dado que los terremotos pueden representar una amenaza significativa para la estabilidad y seguridad de los depósitos, es fundamental comprender cómo se comportarán frente a eventos sísmicos y tomar las medidas adecuadas para minimizar los riesgos asociados. La evaluación de las respuestas sísmicas implica el análisis de la interacción entre el terremoto y el depósito de relaves. Se consideran varios aspectos, como las características sísmicas del área donde se ubica el depósito, la respuesta dinámica del suelo, la geometría y la capacidad de resistencia del depósito en sí.



Para llevar a cabo esta evaluación, se utilizan métodos de análisis geotécnico y sísmico, como el análisis de respuesta sísmica a través de modelos numéricos o el análisis de respuesta en el dominio del tiempo o de la frecuencia. Estos métodos permiten simular y predecir el comportamiento del depósito de relaves durante un terremoto, considerando factores como la aceleración, la deformación, la presión del agua y la estabilidad global (Boada *et al.*, 2021).

La evaluación de las respuestas sísmicas tiene como objetivo principal determinar la capacidad de resistencia del depósito ante eventos sísmicos, identificar las áreas vulnerables y establecer medidas de mitigación adecuadas. Los resultados de la evaluación de respuestas sísmicas ayudan a orientar el diseño y la construcción de los depósitos de relaves. Estos resultados también se utilizan para establecer criterios de operación y mantenimiento, así como para desarrollar planes de contingencia en caso de eventos sísmicos severos (Rocio, 2022).



The background features a large, abstract geometric design composed of several overlapping shapes in a muted brown color. At the top, a semi-circle is partially cut off by the top edge. Below it, a circle is positioned such that its top half is within the semi-circle's area and its bottom half extends downwards. To the left of the circle, a vertical rectangular shape is partially cut off by the left edge. Below this rectangle, a quarter-circle is positioned. At the bottom, a large, curved shape resembling a thick, curved line or a partial arc spans across the width of the page.

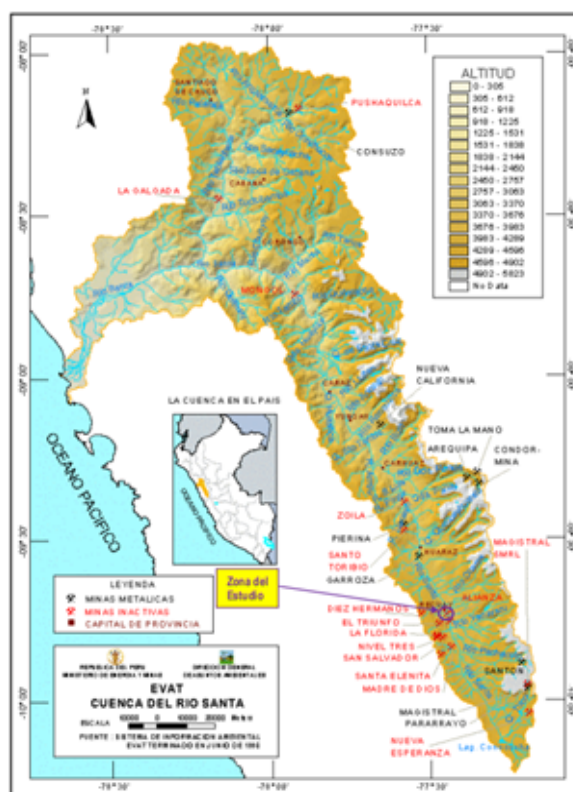
Capítulo III

**Depósitos de relave en  
abandono en  
Ticapampa, río Santa:  
caracterización  
geotécnica**

La zona de Ticapampa, situada en la margen izquierda del río Santa en la cordillera Negra, es un distrito minero destacado con una mineralización polimetálica de plata, plomo, zinc y oro que ha sido conocida desde la época colonial. En el pasado, las minas Collaracra y Huancapetí operaban con tecnología rudimentaria y extracción selectiva a pequeña escala. En 1895, la Compañía Minera Ticapampa se convirtió en la Compañía Anglo French Ticapampa Silver Mining Company Ltd., alcanzando su mayor capacidad de explotación en 1904. A partir de 1967, los activos mineros fueron transferidos a la Compañía Minera Alianza S. A., formada por inversionistas nacionales y estadounidenses, que utilizó las instalaciones existentes. A partir de 1970, la compañía se enfocó en las minas Hércules y Florida, y la planta concentradora de Ticapampa alcanzó su máxima capacidad en 1980. Sin embargo, en 1984, la compañía abandonó la explotación minera.

Tanto la planta concentradora de Ticapampa como los relaves de otras plantas concentradoras en la misma cuenca del río Santa causaron contaminación en la zona. La Compañía Minera Alianza S. A. cerró sus operaciones en 1992 y actualmente se denomina Cía. Minera Yahuarcocha S. A. Esta empresa es responsable del Pasivo Ambiental Minero en la zona de Mina Alianza, ubicada en Ticapampa, que ha estado abandonada durante aproximadamente 23 años. Se espera que la empresa cumpla con las regulaciones vigentes y realice el cierre adecuado de los relaves de Ticapampa, incluyendo estos aspectos en sus estudios y programas ambientales presentados al Ministerio de Energía y Minas. La Figura 1 muestra la ubicación de la zona de estudio en el Distrito de Ticapampa, Provincia de Recuay, Región Áncash. En la Figura 2 se visualiza la locación de depósitos desde una vista satelital y, en la Figura 3, una vista panorámica de los depósitos de relave en Ticapampa.

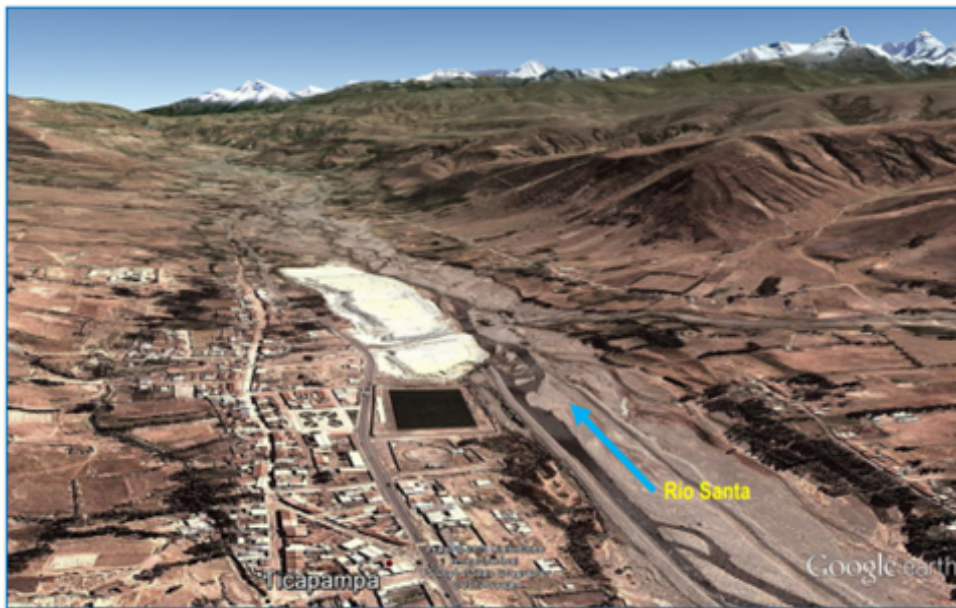
**Figura 1**  
Localización de la zona de estudio (Dirección General de Asuntos Ambientales, Ministerio de Energía y Minas)





## Figura 2

Imagen Satelital de los depósitos de relave de Ticapampa (Google Earth)



## Figura 3

Fotografía que muestra una vista general de los depósitos de relave de Ticapampa



En la Figura 4 se presenta una visión del estado actual de los depósitos de residuos mineros ubicados en Ticapampa y en la cuenca del río Santa. Estos depósitos de relave constituyen algunos de los pasivos ambientales mineros más extensos de Perú y representan una amenaza continua para la contaminación ambiental en la zona y aguas abajo de la cuenca del río Santa.

## Figura 4

Vista general de los depósitos de relave de Ticapampa (Google Earth)



En la Figura 5 se enseña la topografía detallada de los depósitos de relave en Ticapampa, que incluye los trabajos de campo e investigación requeridos para llevar a cabo la caracterización geotécnica de estos pasivos ambientales mineros. Estos estudios tienen como objetivo evaluar el comportamiento sísmico geotécnico y la estabilidad de los depósitos, proporcionando información crucial para su gestión adecuada.

## Figura 5

Topografía de los depósitos de relave de Ticapampa



## Geología, geomorfología y sismicidad de la zona de estudio

### Geología local

En la Figura 6 se exhibe un resumen de la geología general de la zona de estudio, la cual es objeto de investigación. Se ofrece un panorama general centrado en las características geológicas relevantes, brindando una base sólida para comprender el contexto geológico y los procesos que influyen en el área de estudio.

### Figura 6

Geología regional de la zona de estudio (Ingemmet)

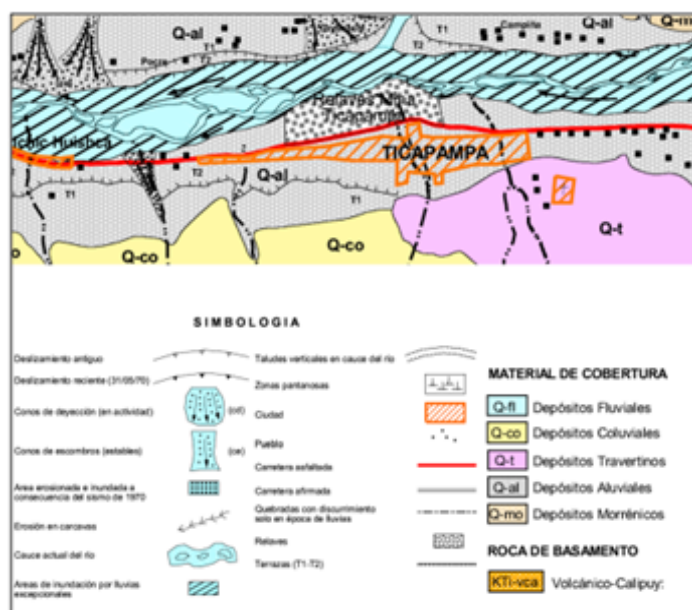


En la Figura 6 se observan las unidades litológicas y la estructura geológica de la zona de estudio. En términos generales, las rocas ígneas intrusivas están presentes en el emplazamiento significativo conocido como el "Batolito de la cordillera Blanca", mientras que las rocas ígneas extrusivas, principalmente de origen volcánico, son prominentes en la cordillera Negra.

En la Figura 7 se manifiesta un análisis detallado de la geología local en la zona de estudio de la investigación, que incluye la descripción de las unidades litológicas y la influencia de la geodinámica externa en la formación y ubicación de los depósitos de relave. Se examina la composición y características de las rocas presentes en la zona, así como los procesos geológicos externos que han contribuido a la deposición y distribución de los relaves en el área.

**Figura 7**

Geología local de la zona de estudio (Ingemmet)



A continuación, se describen las características geológicas de los depósitos de relave en Ticapampa, considerando que el conocimiento de la geología del lugar proporciona datos acerca de la disposición y características de las formaciones litológicas y rocas ígneas presentes en el área del proyecto, se emplearon datos del Ingemmet y de los estudios de campo para determinar las condiciones geológicas.

La zona de investigación está situada en el lado occidental de la cordillera Blanca y en el lado oriental de la cordillera Negra, dentro del valle del río Santa. Exhibe un terreno irregular y abrupto con pendientes pronunciadas y superficies rocosas. El principal curso de agua regional es el río Santa, al cual descienden diversas quebradas tributarias de carácter torrentoso.

Los depósitos de relave se encuentran en una zona que se extiende desde la vía hacia Huaraz hasta el curso del río Santa, abarcando un área aproximada de 12 hectáreas. Estos depósitos se sitúan en la margen izquierda de dicho río, en una plataforma elevada junto al cauce fluvial reciente.

En cuanto a la composición de los depósitos de relave de Ticapampa, se observa una capa superficial de relave oxidado de color amarillo gris-verdoso, con una textura densa. El depósito está compuesto principalmente por material limo arenoso de color gris, con presencia de arena de grano fino. El material es húmedo, no plástico, y su grado de compactación varía de suelto a semicompacto. Justo bajo la capa de material de desecho, se localiza una formación de conglomerado proveniente del río, con gravas de forma redondeada y mal clasificadas. Este conglomerado es húmedo, no plástico y compacto.

### *Litología*

Material de cobertura. La denominación se refiere a una amplia distribución de materiales sueltos presentes en el área de estudio. En el mapa de la geología local, se puede observar que los depósitos de relaves se encuentran ubicados sobre depósitos aluviales, los cuales se caracterizan de la siguiente manera:

Material aluvial (Q-al). Estos materiales sueltos se hallan tanto en las márgenes del río Santa, donde forman una serie de terrazas significativas, como en menor medida en las márgenes de las quebradas principales que descienden de la cordillera Blanca. Estos depósitos de materiales demuestran el proceso evolutivo que experimentan los ríos, en este caso el río Santa, que al erosionar y profundizar su cauce va dejando a los costados los sedimentos depositados.

Estos materiales aluviales tienen un origen diverso, pero en conjunto son el resultado de la desintegración de la roca madre debido a la intensa actividad glaciar. Estos sedimentos son transportados exclusivamente por corrientes de agua significativas y, a lo largo del tiempo geológico, se depositan lateralmente.

En términos de su composición litológica, es importante destacar que, aunque son similares en naturaleza, los sedimentos aluviales transportados y depositados por el río Santa contienen menos elementos finos, como arcillas y limos, y presentan un mayor contenido de arenas en comparación con los materiales depositados por las quebradas tributarias. Esto se debe a su clasificación natural como resultado del recorrido al que han sido sometidos.

Además, como se observa en Figura 7, se pueden encontrar depósitos morrénicos (Q-mo), depósitos coluviales (Q-co) y depósitos travertinos (Q-t).

#### *Geología estructural*

En el área de interés para este estudio, se han identificado estructuras geológicas como fallas, tanto antiguas como modernas.

#### *Fallamientos antiguos*

Se observa en el área de estudio un conjunto de fallas segmentadas que siguen predominantemente un rumbo SE-NW, y que interceptan con fallas menores de rumbo S-N. Estas fallas recorren tanto rocas de origen volcánico como sedimentario y, en algunos casos, representan un contacto fracturado entre ambos tipos de rocas. Se ha determinado que estas fallas antiguas fueron rutas de salida para el magma que fluyó desde el interior de la Tierra en un pasado geológico. Sin embargo, en el terreno actual, estas fallas antiguas no parecen tener influencia significativa en la estabilidad de los suelos que atraviesan, y su presencia se ha identificado a través de la interpretación geológica.

#### *Fallamientos modernos*

- a. Falla de la cordillera Blanca.** Esta falla, que se extiende a lo largo de aproximadamente 200 km en la margen occidental de la cordillera Blanca, es en realidad un sistema compuesto por múltiples fallas. Se considera una falla moderna desde el punto de vista geológico y desempeña un papel crucial en la evaluación de riesgos en el área del Callejón de Huaylas. Existen evidencias claras de que esta falla podría ser una fuente de liberación de energía sísmica, lo que podría generar terremotos destructivos que representarían un riesgo para las poblaciones y las estructuras geotécnicas en la zona. Aunque no se han registrado eventos sísmicos importantes en los últimos 2,000 años, se ha catalogado esta estructura como una fuente sismogénica continental (interplaca), con la posibilidad de que en el futuro ocurran rupturas con desplazamientos verticales de hasta 3 metros y sismos con

una magnitud (Ms) de hasta 7.4. Según estudios, se estima que el intervalo de ocurrencia de estos eventos sísmicos sería de 1 900 a 2 800 años.

- b. Falla Áncash.** Esta estructura geológica moderna es notable en la vertiente occidental de la cordillera Blanca, específicamente en el segmento de Catac-Recuay, y posiblemente se extiende hasta la zona de Huaraz. Según las observaciones realizadas en el campo, se cree que esta estructura, conocida como "Falla Áncash", ha sido responsable de los deslizamientos sucesivos que han ocurrido a lo largo del tiempo geológico en el cerro Huancapampa, ubicado frente a la ciudad de Recuay. Sin embargo, estos deslizamientos no son necesariamente causados por la liberación de energía sísmica de la falla, sino más bien debido a que la traza de la falla ha debilitado el material que atraviesa. Esto ha facilitado la ocurrencia de deslizamientos inducidos por la vibración sísmica externa, como ocurrió durante el sismo del 31 de mayo de 1970. Como resultado de estos deslizamientos, se produjo un represamiento en el cauce del río Santa.

### *Geomorfología*

El tramo investigado, que abarca desde el sur de Catac hasta el norte de Recuay, se encuentra en la cuenca alta del río Santa, dentro de la unidad morfoestructural conocida como "cordillera Occidental". Esta unidad incluye las subunidades del Flanco Occidental de la cordillera Blanca, Flanco Oriental de la cordillera Negra y valle del río Santa. Desde una perspectiva geomorfológica, esta área se sitúa en dicha unidad morfoestructural regional.

- a. Flanco occidental de la cordillera Blanca.** Esta formación geomorfológica presenta una pendiente media de aproximadamente 25 grados y está compuesta por una acumulación significativa de material morrénico. La superficie de esta área se encuentra disectada por ríos y quebradas que descienden desde la región glacial de la cordillera Blanca y se unen al curso principal del río Santa. Entre estas quebradas se encuentran Chaupis, Yarus y el río Yanayacu, cuyas corrientes convergen frente al poblado de Ticapampa. Durante periodos de intensas precipitaciones, estas corrientes aumentan su actividad dinámica y arrastran grandes volúmenes de conglomerados que se erosionan fácilmente en su trayecto. Estos sedimentos impactan y obstruyen el cauce del río, desviándolo hacia su margen izquierda.
- b. Flanco oriental de la cordillera Negra.** Esta topografía muestra una pendiente irregular hacia el este de la ciudad de Recuay, Ticapampa y Cátac, con inclinaciones que varían entre 10° y 40°. En esta zona, el terreno está disectado por quebradas que en el pasado tuvieron una importancia significativa debido a la actividad glacial, pero en la actualidad son relieves bien modelados y no muestran signos de erosión debido a la escasa cobertura de material suelto. En muchos lugares, la roca base aflora a la superficie. Estas quebradas actúan como colectores de agua durante las estaciones lluviosas, transportando el agua hacia el cauce del río Santa a través de las ciudades, pero ahora como pequeños canales superficiales. En la ciudad de Ticapampa, las rocas de basamento no se presentan como afloramientos rocosos en la plataforma (terrazas aluviales), pero se encuentran muy cerca en la margen izquierda, formando el importante afloramiento de la cordillera Negra.

Las terrazas donde se ubica la zona de estudio consisten en material suelto, aunque con cierta compacidad debido a su antigüedad. Están compuestas principalmente por gravas de litología resistente y dura, con una matriz compuesta principalmente de arena y una capa arcillosa y limosa. Se pueden distinguir una plataforma superior, que es más antigua y alberga la mayor parte de la población, y una terraza inferior más reciente, menos compacta y más susceptible a posibles inundaciones causadas por las crecidas del río Santa.

- c. Valle del Santa.** El río Santa, que fluye de sur a norte, se encuentra en el valle ubicado entre las dos unidades descritas anteriormente. A lo largo de este valle, a ambos lados del río, se encuentran las terrazas aluviales formadas por el transporte y deposición de material suelto arrastrado por las aguas. Estas terrazas han sido el lugar de establecimiento de los poblados de Recuay, Ticapampa y Catac, pero están expuestas a la erosión causada por las aguas del río Santa en su curso actual.

La geomorfología del lecho del río muestra dos zonas características de erosión y deposición. La primera prevalece en los taludes cercanos a los extremos del cauce, mientras que la segunda es el resultado del arrastre de partículas desde aguas arriba que se depositan en el mismo cauce del río, formando canteras de materiales de construcción como hormigón, arena y piedras.

Los fenómenos de geodinámica externa que causan más daño en la zona son los desbordamientos del río Santa debido a las intensas lluvias, que ocurren principalmente entre los meses de diciembre y abril, y afectan principalmente la margen izquierda del río Santa aguas abajo. A lo largo de su recorrido, el río Santa ha erosionado progresivamente principalmente rocas volcánicas y rocas sedimentarias, con fluctuaciones en su desplazamiento lateral, posiblemente debido a la dinámica glaciaria en retroceso hacia el este. La erosión lateral del río Santa, especialmente en su margen izquierda desde Ticapampa hasta Recuay, es de suma importancia. Los fenómenos de geodinámica externa más característicos en la zona son la erosión de las orillas, la erosión de cárcavas y los deslizamientos.

Debido al continuo proceso de erosión del lecho del río, así como al arrastre de material, también se han producido depósitos laterales en áreas de menor erosión, lo que finalmente ha dado lugar a la formación de las terrazas aluviales. Las dimensiones de estas terrazas están relacionadas con la dinámica del río. Estas terrazas aluviales han permitido el asentamiento de centros poblados, como la ciudad de Ticapampa que se encuentra en la margen izquierda del río Santa. De esta manera, se deduce que la terraza donde se encuentra el área de la ciudad de Ticapampa y los depósitos de relaves están en contacto directo con afloramientos de rocas volcánicas, y es posible que estas rocas estén ubicadas a poca profundidad debajo de ellas.

### *Sismicidad*

Perú se encuentra en una de las regiones más activas en términos de actividad sísmica en todo el mundo, ya que forma parte del cinturón de fuego del Pacífico. El país ha experimentado una notable cantidad de movimientos telúricos, tanto por su magnitud como por el largo período que abarca, superando los 400 años de registro.

La intensa actividad sísmica y otros fenómenos relacionados están vinculados a las características tectónicas de la región occidental de Sudamérica, que incluye la cordillera de los Andes y la fosa oceánica Perú-Chile. Estos rasgos son consecuencia de la interacción de dos placas convergentes, lo cual da lugar al proceso orogénico actual que ha dado forma a los Andes. Los terremotos son producidos por la fricción continua entre las placas, y su ubicación delimita los bordes de estas placas. En el caso de la región occidental de Sudamérica, los sismos se deben a la subducción de la placa oceánica de Nazca debajo de la placa continental sudamericana.

Los depósitos de relaves en Ticapampa se encuentran en plena cordillera de los Andes, donde los sismos predominantes tienen una profundidad focal que varía entre 70 y 300 km. Sin embargo, también ocurren sismos superficiales debido al empuje principal de la subducción entre las placas. Estudios realizados en esta área indican que la máxima aceleración del suelo se determina para varios períodos de retorno, como se muestra en la Tabla 1 y la Figura 8 del estudio "Peligro Sísmico Probabilístico y Espectro Uniforme en la Región Áncash" realizado por De La Cruz (2011).

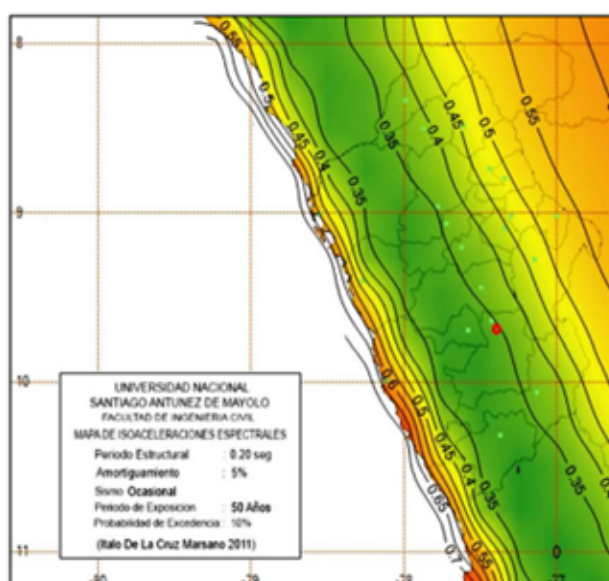
**Tabla 1**

*Aceleraciones sísmicas máximas esperadas, para diversos períodos de retorno en el área de estudio*

Períodos de retorno (años)	Aceleración Sísmica de Diseño $a_{max}$ (%g)
50	0.18
100	0.21
200	0.26
475	0.35
950	0.41

**Figura 8**

*Mapa de isoaceleraciones, para un periodo de retorno de 475 años, con una probabilidad de excedencia del 10%*



*Nota.* Tomado de De la Cruz (2011).



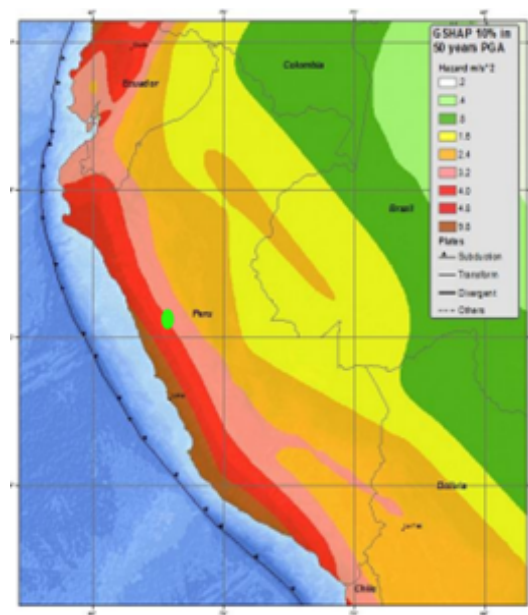
La elección del evento sísmico para el diseño estructural varía según el tipo de construcción. En el área de estudio, se abarca un intervalo de recurrencia de 475 años para el terremoto de diseño, el cual se aplica a edificaciones que tienen una vida útil de 50 años y presentan un nivel de superación del 10 % del valor propuesto. En este caso, el valor de diseño es de 0.35 g.

De acuerdo con la normativa ambiental, se recomienda utilizar la aceleración sísmica de diseño correspondiente a un intervalo de recurrencia de 475 años para el análisis dinámico de la estabilidad de taludes. Por lo tanto, la aceleración sísmica máxima de diseño será de 0.35 g, y se aplicará este valor para escalar la aceleración temporal del sismo ocurrido el 31 de mayo de 1970, considerado como el sismo de diseño para el área de estudio.

Dado el alto nivel de actividad sísmica en la zona y la magnitud de los eventos que ocurren, los análisis dinámicos se vuelven cada vez más importantes en los diseños y análisis de estructuras en general. En las Figuras 9, 10 y 11, tomadas de las páginas web del USGS y del CISMID, se muestra la elevada sismicidad que caracteriza al Perú y la distribución de los sismos a lo largo del territorio.

### Figura 9

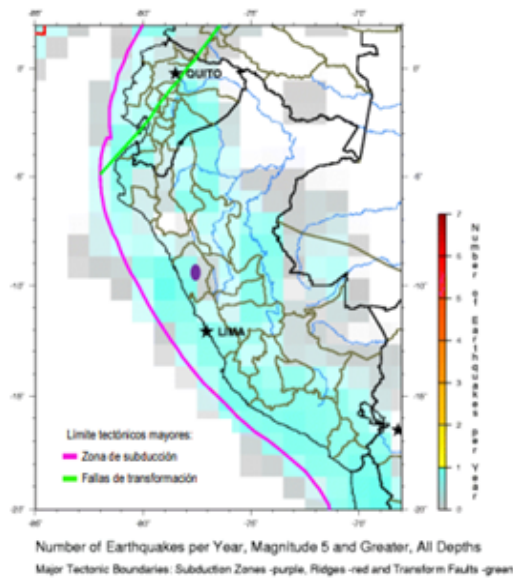
Mapa de riesgo sísmico del Perú. Aceleración pico del terreno ( $m/s^2$ ) con 10 % de excedencia en 50 años



Nota. Página web USGS: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/peru/gshap.php>

## Figura 10

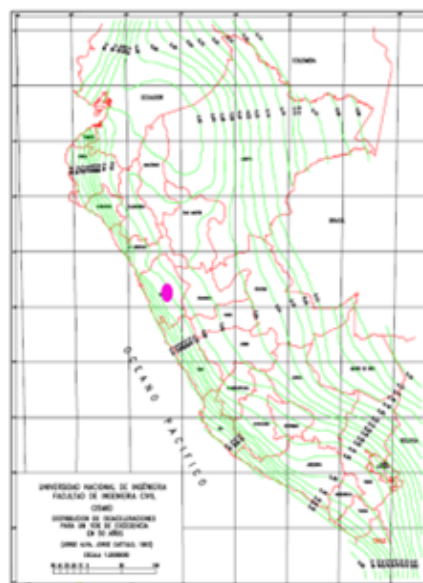
Mapa de densidad sísmica del Perú. Número de sismos por año, de magnitud 5 o mayor, a todas las profundidades



Nota. Tomado de USGS: <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/peru/density.php>

## Figura 11

Mapa de riesgo sísmico del Perú. Aceleración pico del terreno ( $m/s^2$ ) con 10 % de excedencia en 50 años



Nota. Tomado de Alva (2004)

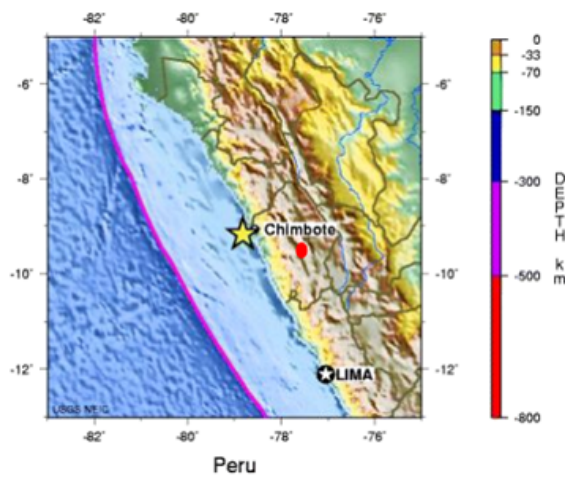
Según la historia sísmica de Perú, el sismo del 31 de mayo de 1970 fue el más devastador de los últimos años en nuestra zona de estudio. Este sismo afectó un área aproximada de 355 km paralela a la línea de costa y 170 km tierra adentro. Sus consecuencias fueron catastróficas, causando la pérdida de 67 000 vidas, 150 000 heridos, 800 000 personas desplazadas y 2 000 000 de personas afectadas en general. Además, el 95 % de las viviendas de adobe resultaron destruidas, así como 6730 aulas en

18 ciudades con una población total de 309 000 habitantes. Los sistemas de alcantarillado quedaron dañados y las facilidades de riego en 110 000 hectáreas resultaron afectadas. Se interrumpió el 77 % de los caminos en La Libertad y Ancash, así como el 40 % de los caminos en Chancay y Cajatambo. Las pérdidas económicas se estimaron en 500 millones de dólares estadounidenses.

El terremoto, con una magnitud MS de 7.7 en la escala de Richter, ocurrió a las 15:23 horas (hora local) en la zona marítima del departamento de Áncash. En el análisis dinámico de los depósitos de relave, se tomará en consideración la información recopilada sobre este sismo, y se ingresará la aceleración temporal del mismo en el programa Quake/W 2007 para evaluar el comportamiento sísmico geotécnico de los depósitos.

**Figura 12**

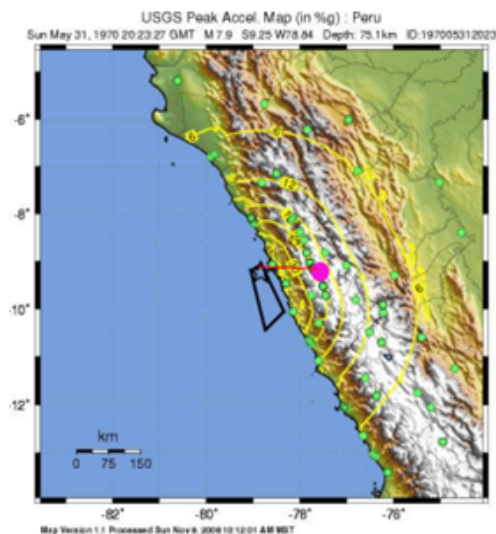
*Mapa del sismo del 31-05-1970 en Áncash-Perú.*



*Nota.* Tomado de [http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/events/1970\\_05\\_31.php](http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world/events/1970_05_31.php)

**Figura 13**

*Mapa de aceleraciones pico del sismo del 31-05-1970 Áncash-Perú*



*Nota.* Tomado de <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world>

## Figura 14

Mapa de intensidades del sismo del 31-05-1970 Áncash-Perú

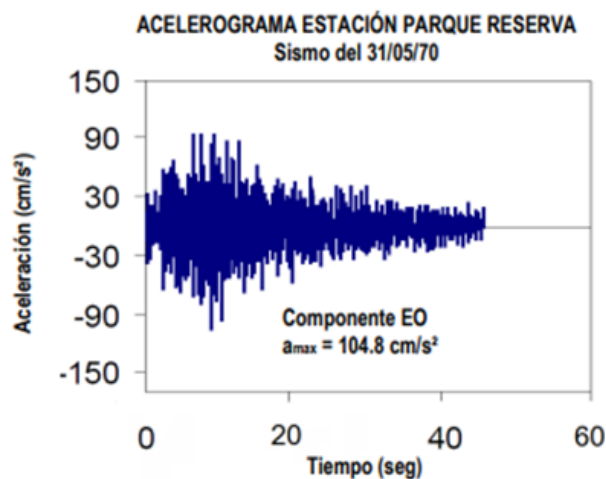


Nota. Tomado de <http://earthquake.usgs.gov/earthquakes/world>

Las Figuras 12, 13 y 14 presentan las características sísmicas del terremoto que tuvo lugar el 31 de mayo de 1970, el cual fue el más devastador y de mayor magnitud registrado en el área de estudio. La Figura 15 exhibe el acelerograma correspondiente a la componente E-O (este-oeste), que experimentó la mayor aceleración, obtenido en la estación del Parque de la Reserva en Lima.

## Figura 15

Acelerograma del sismo del 31-05-1970 E-O (CISMID)



La Tabla 2 expone los datos del evento sísmico seleccionado para los análisis realizados en esta tesis. Los registros sísmicos, que consisten en datos de aceleración, fueron obtenidos electrónicamente de la página web de CISMID. Para el análisis dinámico se utilizó el archivo de aceleración estándar PQR-7005311523 correspondiente al sismo del 31 de mayo de 1970 (Figura 16), el cual fue previamente convertido al formato de archivo requerido por el *software* Quake/W. Se generaron datos para los

primeros 30 segundos de duración del sismo. El registro sísmico utilizado para el análisis dinámico corresponde al archivo tipo ACC Sismo 31-05-1970 E-O 30s (Figura 17).

**Tabla 2**

*Datos del evento sísmico seleccionado para el análisis dinámico*

Fecha de sismo	Lugar	Magnitud Mw	Distancia a Ticapampa (Km)	Profundidad Focal (Km)	Duración Aprox. (s)	Aceleración Pico E-W (g)	Aceleración Pico N-S (g)	Aceleración Pico U-D (g)
31 de Mayo de 1970	Chimbote Ancash	7.9	145	71	45.16	0.11	0.10	0.07

Mw =  
Magnitud de momento

**Figura 16**

*Archivo de aceleración estándar PQR-7005311523 del sismo del 31-05-1970 (CISMID)*

```

prq-7005311523: Bloc de notas
Archivo Edición Formato Ver Ayuda
UNIVERSIDAD NACIONAL DE INGENIERÍA
FACULTAD DE INGENIERÍA CIVIL
CENTRO PERUANO-JAPONÉS DE INVESTIGACIONES
SISMICAS Y MITIGACIÓN DE DESASTRES
AV. TUPAC AMARU N° 1150 - Lima 25 - PERÚ Apartado Postal 31-250 Lima 31
Teléfonos (51 - 1) 482-0777, 482-0804, 482-0790 FAX 481-0170
e-mail: director@cismid.uni.edu.pe http://www.cismid.uni.edu.pe

ARCHIVO ESTANDAR DE ACCELERACIÓN:
NOMBRE DEL ARCHIVO : PRQ-7005311523
REF. CATALOGO ACELEROGRAMAS :

DATOS DE LA ESTACIÓN:
NOMBRE DE LA ESTACIÓN : PARQUE DE LA RESERVA
CLAVE DE LA ESTACIÓN : PRQ
LOCALIZACIÓN DE LA ESTACIÓN : Parque de la Reserva
Lima
COORDENADAS DE LA ESTACIÓN : 12.06° LAT. S
77.05° LONG. W
ALTITUD(msnm) :
TIPO DE SUELO : Grava gruesa
INSTITUCIÓN RESPONSABLE : CISMID-UNI

DATOS DEL ACELEROGRAFO:
MODELO DEL ACELEROGRAFO :
NÚMERO DE SERIE DEL ACELEROGRAFO :
NÚMERO DE CANALES :
ORIENTACIÓN, Canal1/Canal2/Canal3 : E-W N-S U-D
FREC. DE MUESTREO, Canal1/Canal2/Canal3 (muestr : 30 50 50
MAX. AMPLITUD DE SENSORES, Canal1/Canal2/Canal3 :
PERIODO DEL INSTRUMENTO, Canal1/Canal2/Canal3 (s) : 0.065 0.066 0.066
AMORTIGUAMIENTO DE SENSORES, Canal1/Canal2/Canal : 0.61 0.55 0.62
INTERVALO DE MUESTREO, Canal1/Canal2/Canal3 (s) : 0.02 0.02 0.02
UMBRAL DE DISPARO, Canal1/Canal2/Canal3 (gal) :
MEMORIA DE PRE-EVENTO (s) :
TIEMPO DE POST-EVENTO (s) :

DATOS DEL SISMO:
FECHA DEL SISMO : 31 de Mayo de 1970
HORA EPICENTRO (LOCAL) : 15:23
COORDENADAS DEL EPICENTRO : 9.36° LAT. S
78.87° LONG. W
PROF. FOCAL /DIST. EPIC. /DIST. HIPOC. (km) : 64 361 367
MAGNITUD : mb MS Mw
6.6* 7.8** 7.7S
FUENTE DE LOS DATOS EPICENTRALES : IGP(*) S11gado(S) USCGS(**)

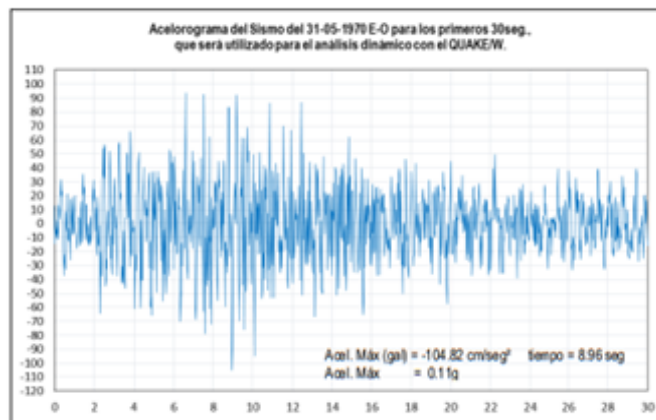
DATOS DE ESTE REGISTRO:
HORA DE LA PRIMERA MUESTRA (GMT-5) :
DURACIÓN DEL REGISTRO (s), Canal1/Canal2/Canal3 : 45.16 45.16 45.02
NUM. TOTAL DE MUESTRAS, Canal1/Canal2/Canal3 : 2259 2259 2252
ACEL. MAX. (GAL), Canal1/Canal2/Canal3 : -104.8 -97.7 73.5
UNIDADES DE LOS DATOS : Gal (cm/s/s)

DATOS DE ACCELERACION:
DT E-W N-S U-D
0.00 -14.223 7.834 -21.346
0.02 12.708 2.929 -3.329
0.04 2.069 -2.845 1.237
0.06 -8.181 -7.455 1.873
0.08 -4.257 -9.429 1.042
0.10 -10.572 -1.081 0.728
0.12 0.577 6.264 -6.048
0.14 2.518 -2.626 -6.510
0.16 -11.410 -10.022 -0.085
0.18 -1.982 -8.738 2.483
0.20 13.028 -5.407 9.390
0.22 9.647 2.944 7.760
0.24 3.006 13.616 9.922
0.26 7.370 13.008 16.456
0.28 13.933 -2.434 17.814
0.30 25.944 -11.063 15.961
0.32 31.862 -6.161 1.355
Continúa
    
```

**Figura 17**

Archivo tipo ACC y acelerograma del sismo 31-05-1970 E-O 30s para el análisis dinámico con el Quake/W

Sismo 31-05-1970 E-O 30s. Bloc de notes									
Archivo Edición Formato Ver Ayuda									
Seismic record - 31-05-70 E-O - 30 sec - max acc 104.82 gal at 8.96 sec									
1500 1500 0									
Time	ACC	Time	ACC	Time	ACC	Time	ACC	Time	ACC
new format for quake/w									
2	1								
0.02	32.73	0.04	2.07	0.06	-8.18	0.08	-4.26	0.10	-10.17
0.12	0.58	0.14	2.52	0.16	-11.41	0.18	-1.98	0.20	11.03
0.22	9.65	0.24	1.03	0.26	7.17	0.28	11.93	0.30	23.94
0.32	31.86	0.34	20.00	0.36	21.00	0.38	23.57	0.40	16.17
0.42	-1.47	0.44	-18.89	0.46	-17.06	0.48	-17.40	0.50	-22.32
0.52	-32.99	0.54	-22.84	0.56	8.31	0.58	6.77	0.60	-5.18
0.62	9.05	0.64	-21.68	0.66	8.01	0.68	-11.12	0.70	-12.40
0.72	-3.10	0.74	-7.66	0.76	-26.03	0.78	-21.78	0.80	6.74
0.82	17.39	0.84	1.83	0.86	-8.09	0.88	-7.42	0.90	15.03
0.92	2.74	0.94	-7.79	0.96	-4.25	0.98	7.45	1.00	15.94
1.02	14.23	1.04	-2.03	1.06	-8.21	1.08	-6.74	1.10	-12.32
1.12	-17.68	1.14	-11.02	1.16	-5.98	1.18	-1.48	1.20	3.34
1.22	4.49	1.24	2.97	1.26	-2.32	1.28	-15.67	1.30	-11.26
1.32	10.62	1.34	16.43	1.36	-4.95	1.38	-11.17	1.40	14.86
1.42	15.43	1.44	25.05	1.46	21.19	1.48	26.25	1.50	30.75
1.52	9.72	1.54	-8.36	1.56	-11.43	1.58	13.87	1.60	11.91
1.62	-8.44	1.64	-11.75	1.66	-5.76	1.68	-10.38	1.70	-6.27
1.72	-15.97	1.74	-8.00	1.76	-6.57	1.78	-14.44	1.80	-11.82
1.82	4.93	1.84	-12.44	1.86	-9.76	1.88	10.82	1.90	16.23
1.92	20.20	1.94	-11.34	1.96	18.43	1.98	15.54	2.00	24.73
2.02	10.10	2.04	-1.11	2.06	5.61	2.08	11.16	2.10	-4.65
2.12	-22.67	2.14	-1.32	2.16	19.18	2.18	-7.33	2.20	-11.87
2.22	-13.89	2.24	-1.35	2.26	-10.54	2.28	-5.85	2.30	-04.04
2.32	-25.78	2.34	-20.21	2.36	-17.55	2.38	-18.29	2.40	14.53
2.42	41.00	2.44	11.75	2.46	15.66	2.48	12.55	2.50	16.44
2.52	15.94	2.54	8.52	2.56	-44.97	2.58	-40.43	2.60	15.89
2.62	-12.44	2.64	-9.06	2.66	8.90	2.68	-16.23	2.70	-12.61
2.72	-7.78	2.74	5.03	2.76	25.15	2.78	52.13	2.80	40.05
2.82	-11.45	2.84	-24.96	2.86	-8.73	2.88	-30.68	2.90	14.87
2.92	7.26	2.94	12.17	2.96	-14.77	2.98	-1.03	3.00	28.13
3.02	12.60	3.04	9.43	3.06	-3.19	3.08	-5.25	3.10	-4.73
3.12	-15.11	3.14	-17.45	3.16	-11.85	3.18	-3.52	3.20	15.25
3.22	4.56	3.24	56.45	3.26	58.17	3.28	44.44	3.30	17.49
3.32	17.45	3.34	12.77	3.36	-15.08	3.38	-62.42	3.40	30.70
3.42	-30.29	3.44	-42.47	3.46	-29.23	3.48	-5.05	3.50	-18.15
3.52	-40.11	3.54	-46.55	3.56	-26.21	3.58	-1.85	3.60	1.17
3.62	17.04	3.64	50.89	3.66	47.91	3.68	11.15	3.70	7.70
3.72	34.27	3.74	36.74	3.76	-8.16	3.78	-30.86	3.80	8.80
3.82	85.90	3.84	48.10	3.86	-0.71	3.88	-21.02	3.90	-23.66
3.92	-7.19	3.94	7.54	3.96	-6.03	3.98	-1.77	4.00	-2.20
4.02	-28.76	4.04	-60.86	4.06	-46.49	4.08	-22.30	4.10	-11.64
4.12	-28.00	4.14	3.44	4.16	19.99	4.18	24.33	4.20	-13.64
4.22	41.22	4.24	51.21	4.26	46.16	4.28	14.11	4.30	-12.47
4.32	-60.22	4.34	-29.59	4.36	2.46	4.38	-9.44	4.40	-15.92
4.42	-60.52	4.44	-20.75	4.46	18.14	4.48	40.41	4.50	35.98
4.52	17.88	4.54	5.97	4.56	8.52	4.58	17.05	4.60	2.71
4.62	-11.20	4.64	-7.83	4.66	10.34	4.68	11.31	4.70	5.17
4.72	-29.68	4.74	16.46	4.76	4.03	4.78	-21.90	4.80	-18.14
4.82	-12.24	4.84	-17.51	4.86	-60.28	4.88	-52.80	4.90	-65.89
4.92	-21.69	4.94	17.19	4.96	6.84	4.98	-11.05	5.00	12.15
5.02	17.26	5.04	9.53	5.06	7.79	5.08	25.93	5.10	14.55
5.12	-28.52	5.14	-49.42	5.16	-7.48	5.18	17.48	5.20	12.29
5.22	18.17	5.24	17.18	5.26	19.80	5.28	15.57	5.30	10.13
5.32	30.09	5.34	20.26	5.36	-26.14	5.38	-22.17	5.40	27.18
5.42	19.81	5.44	-28.99	5.46	-35.18	5.48	-25.37	5.50	-4.42
5.52	13.23	5.54	16.05	5.56	14.28	5.58	10.09	5.60	10.15
5.62	-30.29	5.64	-20.02	5.66	14.28	5.68	30.21	5.70	18.89
5.72	18.56	5.74	-11.24	5.76	-17.56	5.78	2.89	5.80	12.89
5.82	49.14	5.84	-1.17	5.86	-11.51	5.88	8.44	5.90	14.61
5.92	40.43	5.94	44.06	5.96	18.20	5.98	24.23	6.00	-32.93
6.02	-18.81	6.04	48.12	6.06	28.22	6.08	-11.29	6.10	-1.14
6.12	16.14	6.14	1.31	6.16	-11.63	6.18	-21.87	6.20	-15.64
6.22	1.18	6.24	25.25	6.26	13.28	6.28	10.36	6.30	12.23
6.32	-44.44	6.34	-70.25	6.36	-48.33	6.38	-52.29	6.40	-35.91
6.42	-13.87	6.44	-30.14	6.46	-23.74	6.48	14.80	6.50	18.29
6.52	22.49	6.54	-15.18	6.56	-17.97	6.58	46.41	6.60	91.80
6.62	66.83	6.64	23.43	6.66	-16.48	6.68	-12.44	6.70	-10.69
6.72	-33.05	6.74	8.73	6.76	17.29	6.78	-7.41	6.80	-2.43
6.82	5.47	6.84	-13.49	6.86	-11.43	6.88	5.86	6.90	-1.72



### Ensayos de campo y laboratorio en los depósitos de relave

En este estudio se han llevado a cabo investigaciones de campo y ensayos de laboratorio para determinar las características de resistencia de los materiales presentes en los depósitos de relave abandonados en Ticapampa, así como para identificar el nivel freático dentro de dichos depósitos. Se ha realizado una revisión preliminar de la información existente en el Plan de Cierre de Pasivos del Depósito de Relaves Ticapampa, elaborado por la Compañía Minera Yahuarcocha S. A. Con base en esta información, se han complementado los trabajos de campo y laboratorio, los cuales producen los siguientes resultados:

### *Exploración de campo*

Se han realizado diversas técnicas de exploración geotécnica para obtener información precisa sobre los depósitos de relave en Ticapampa. Estas técnicas incluyen la excavación de calicatas y la perforación de sondajes con ensayos de penetración estándar (SPT), así como la instalación de piezómetros para monitorear el nivel freático. Además, se han realizado ensayos de refracción sísmica como un enfoque indirecto para obtener datos sobre las características del subsuelo. En los anexos adjuntos se encuentra el plano U-1, que muestra la ubicación de todas las exploraciones de campo llevadas a cabo en el estudio.

### **Figura 18**

*Fotografía que muestra el estado actual de los materiales que existen en los depósitos de relave en abandono en Ticapampa*



A continuación, se detallan los trabajos de exploración de campo llevados a cabo en los depósitos de relave abandonados:

#### *Excavaciones*

Se llevaron a cabo excavaciones a cielo abierto, conocidas como calicatas, en diferentes áreas de los depósitos de relave con el objetivo de obtener muestras alteradas e inalteradas y examinar las particularidades de los materiales en cuestión, en su ubicación original a profundidades de hasta 5.30 metros. Para garantizar la seguridad, se implementaron medidas de apuntalamiento utilizando madera para sostener las paredes de la excavación. Las calicatas se realizaron siguiendo las directrices establecidas en la norma NTP 339.162 (ASTM D420). En el plano U-1 se muestran las ubicaciones de las 10 calicatas realizadas en el área de estudio.

#### *Ensayo de penetración estándar (SPT)*

Para determinar las características de compacidad, compresibilidad y resistencia de las arenas de relave, se llevó a cabo el ensayo de penetración estándar. Este método es ampliamente utilizado a

nivel mundial para evaluar las propiedades in situ del terreno. El ensayo consiste en medir la resistencia a la penetración del suelo mediante el número de golpes "N". Este valor se obtiene sumando los golpes necesarios para hundir la varilla partida en los últimos 305 mm de una profundidad total de 460 mm. Además, este ensayo permite obtener muestras representativas para su posterior análisis en laboratorio. El método utilizado para el ensayo de penetración estándar se encuentra descrito en la norma NTP 339.133 (ASTM D1586). En el plano U-1, se muestra la ubicación de los sondajes realizados en el Perfil Longitudinal Sección 1-1, en los puntos SC-1 y SC-2. El perfil 1-1 ha sido seleccionado como una sección crítica para el estudio, considerando la información topográfica y la inspección directa de los depósitos de relave. En esta zona se observa la mayor altura de los depósitos de relave, con un talud aproximado de 1:1.

#### *Instalación de piezómetros*

Con el objetivo de establecer la altura del agua y supervisar los cambios en cada contenedor, se llevaron a cabo la instalación de piezómetros tipo Casagrande después de ejecutar las perforaciones correspondientes. Es relevante destacar que, durante las mediciones realizadas, se detectó la presencia del nivel freático, el cual fue monitoreado especialmente en las condiciones más críticas durante épocas de intensas lluvias en la locación investigativa. En la sección crítica del estudio (Figura 24), se muestra la ubicación donde se encontró el nivel freático, el cual fue considerado para el análisis en nuestra investigación.

#### **Figura 19**

*Ensayo de penetración estándar (SPT), realizada en la ubicación SC-1 del perfil 1-1 (Sección crítica de estudio)*





**Figura 20**

Otra vista del ensayo de penetración estándar (SPT)

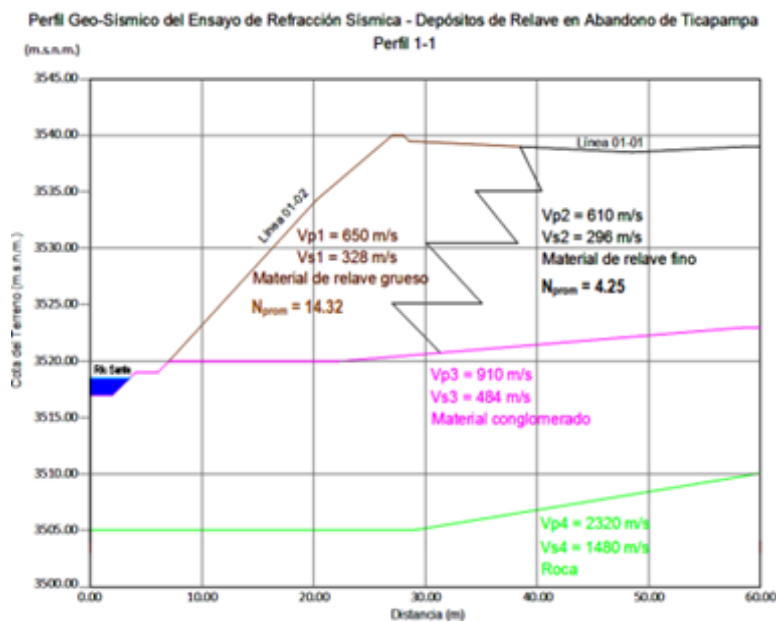


*Refracción sísmica*

Se ejecutaron mediciones utilizando líneas de refracción sísmica con el propósito de complementar la exploración directa en el campo, siguiendo las indicaciones establecidas en la norma NTP 339.157 de 2001. En la Figura 21, se resumen los resultados obtenidos en la sección crítica analizada de los depósitos de relave (Perfil 1-1):

**Figura 21**

*Perfil geosísmico de refracción sísmica-depósitos de relave en abandono de Ticapampa, realizado en el Perfil 1-1 (Sección crítica de análisis)*



Durante el ensayo de refracción sísmica se identificaron cuatro estratos distintos en la zona de estudio. Para el primer estrato superficial, compuesto por material de relave grueso, se registró una velocidad de onda compresional (VP1) de 650 m/s y una velocidad de onda de corte (VS1) de 328 m/s. En el segundo estrato superficial, constituido por material de relave fino, se registró una velocidad de onda compresional (VP2) de 610 m/s y una velocidad de onda de corte (VS2) de 296 m/s. El tercer estrato corresponde a un material conglomerado que actúa como cimentación de los depósitos de relave, con una velocidad de onda compresional (VP3) de 910 m/s y una velocidad de onda de corte (VS3) de 484 m/s. Por último, el estrato más profundo es una roca de basamento que subyace a la zona de estudio, con una velocidad de onda compresional (VP4) de 2320 m/s y una velocidad de onda de corte (VS4) de 1480 m/s.

#### *Ensayos de laboratorio*

A partir de las muestras perturbadas obtenidas de los ensayos de penetración estándar y las calicatas, se llevaron a cabo una serie de pruebas estándar y especiales de mecánica de suelos. Estas pruebas permitieron analizar las propiedades y características de los suelos en estudio:

#### *Ensayos estándar de laboratorio*

Con el objetivo de clasificar las muestras obtenidas de los sondeos y las excavaciones en el terreno según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS) (NTP 339.134 - ASTM D2487), se llevaron a cabo los siguientes ensayos:

Contenido de humedad	NTP 339.127 (ASTM D2216)
Análisis granulométrico por tamizado	NTP 339.128 (ASTM D422)
Límites de Atterberg	NTP 339.129 (ASTM D4318)
Peso específico relativo de sólidos	NTP 339.131 (ASTM D854)

#### *Ensayo de compresión triaxial*

Para evaluar los parámetros de resistencia cortante de los relaves, se efectuaron pruebas de compresión triaxial con consolidación no drenada (CU) con medición de presión de poros (ASTM D4767) y ensayos de compresión triaxial consolidado-drenado (CD) (ASTM D7181). Los resultados obtenidos se resumen en la Tabla 3.

El ensayo CU, que se ejerce con medición de la presión de poros, permite determinar los parámetros de "c" y " $\Phi$ " en términos de esfuerzos totales y esfuerzos efectivos.

Los ensayos CD se emplean principalmente en suelos granulares, como arenas, aunque también pueden aplicarse en suelos finos, aunque necesita un tiempo mayor de varias semanas. La finalidad de estas pruebas es determinar los parámetros de resistencia efectiva  $c'$  y  $\Phi'$  del suelo.

## Figura 22

Fotografías que muestran la zona crítica del talud considerado para el análisis de la presente investigación, así como la costra de relave grueso oxidado



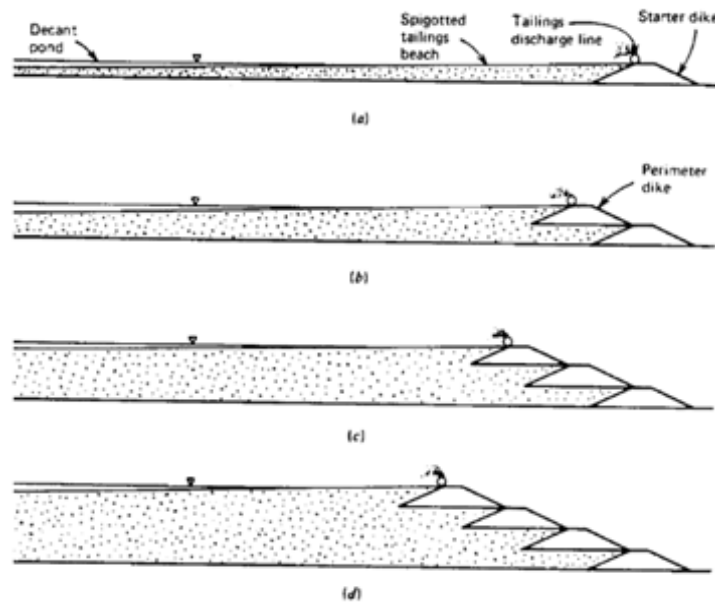
### Sistema constructivo según el método de recrecimiento

En los depósitos de relave de Ticapampa, se utilizó el método constructivo de “aguas arriba” según el método de recrecimiento. Este método ha sido ampliamente utilizado en el pasado en muchos depósitos de relave en el Perú debido a sus ventajas, como su bajo costo, ritmo rápido de construcción y flexibilidad frente a las variaciones de explotación.

Es importante considerar el método de recrecimiento, ya que esto determinará la configuración de la interfase entre el material de relave grueso y fino para la caracterización y modelamiento geométrico del depósito de relave. Según Vick (1990) en su publicación “Planning, Design and Analysis of Tailings Dams”, en el capítulo 3 que trata sobre los métodos de disposición de relaves, el método “aguas arriba” implica la construcción inicial de un dique de arranque. Los relaves se descargan desde la cresta periféricamente para formar una playa, como se muestra en la Figura 23(a). Luego, la playa se transforma en la cimentación para erigir un segundo dique perimetral, tal y como se ilustra en la Figura 23(b). Este proceso se repite a medida que el terraplén aumenta de altura, como se ilustra en las Figuras 23(c) y 23(d).

## Figura 23

Levantamiento secuencial de terraplén de relave por el método de disposición aguas arriba



Nota. Tomado de Vick (1990)

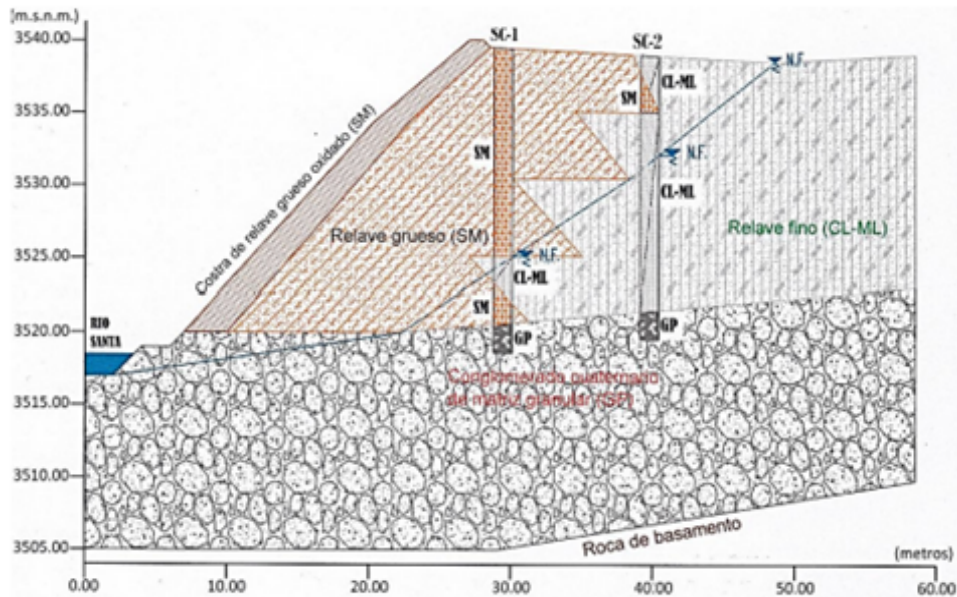
La forma de la interfase entre el relave grueso y fino se determina según el método de recrecimiento y decantación utilizado. Este proceso se representa en la Figura 21 y la Figura 24.

### Caracterización geotécnica de los depósitos de relave

A partir de los estudios geotécnicos realizados, que incluyeron investigaciones directas e indirectas, así como ensayos de campo y laboratorio, se llevó a cabo la caracterización geotécnica de los depósitos de relave en el sector crítico de interés de nuestra investigación, como se muestra en la Figura 22. Como resultado, se elaboró un perfil estratigráfico del depósito de relave, que se detalla en la Figura 24. La forma no homogénea de la estratificación del relave en el perfil se atribuye al método de deposición utilizado, que corresponde a las características geométricas típicas del método de "Aguas Arriba", como se ilustra en la Figura 23.

## Figura 24

Perfil estratigráfico en la sección crítica (Perfil 1-1) del talud de los depósitos de relave en abandono de Ticapampa



En los anexos adjuntos se incluyen los registros correspondientes de los ensayos SPT llevados a cabo en los puntos SC-1 y SC-2, siguiendo la norma NTP 339.133 (ASTM D1586).

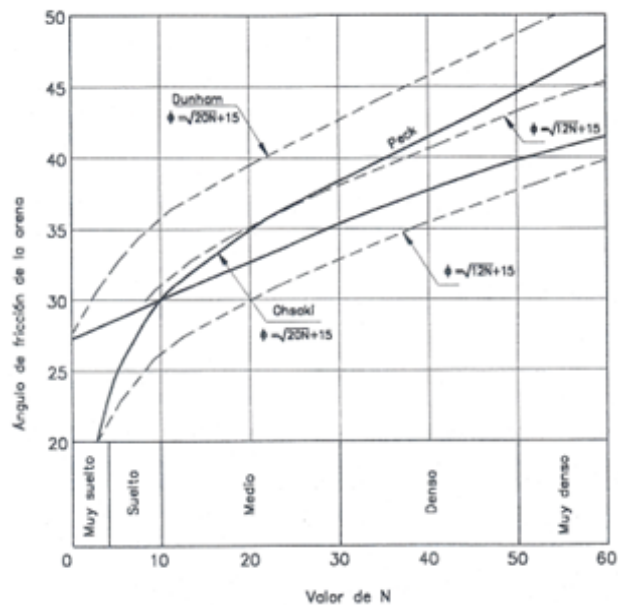
Los resultados obtenidos de los ensayos de campo y laboratorio en los depósitos de relave indican la presencia de materiales clasificados según el Sistema Unificado de Clasificación de Suelos (SUCS). Se han identificado arenas limosas no plásticas (relave grueso-SM) y arcillas limosas de baja plasticidad (relave fino-CL-ML).

Para determinar el nivel freático, se instalaron piezómetros tipo Casagrande que se colocaron desde la superficie hacia el interior de los depósitos de relave. Se realizó un monitoreo adecuado del nivel freático durante las condiciones más críticas, especialmente durante las intensas lluvias que ocurren en la zona de estudio. Los resultados de este monitoreo se presentan en la sección crítica del estudio, como se muestra en la Figura 24.

Al estimar el ángulo de fricción interna de los materiales encontrados en los depósitos de relave, se consideraron relaciones empíricas previas aplicables a suelos de tipo arenoso debido a la falta de plasticidad en las arenas limosas correspondientes al relave grueso, y a la baja plasticidad en las arcillas limosas correspondientes al relave fino. Estas correlaciones son compatibles con los ensayos de compresión triaxial de laboratorio realizados en dichos materiales y se presentan en la Figura 25, proporcionando una referencia para estimar el ángulo de fricción basado en los valores de "N" obtenidos en el ensayo de penetración estándar (SPT).

## Figura 25

Ángulo de fricción de arenas en función del valor N del SPT



Nota. Tomado de Cárdenas (2001)

En la Figura mostrada, se puede visualizar la asociación planteada por Ohsaki (1959), la cual presenta una curva promedio en comparación con las demás curvas presentadas por diferentes autores. La fórmula empírica correspondiente a esta correlación es la siguiente:

$$\bar{\phi} = \sqrt{20N_1} + 15$$

Donde:

$\phi$ : ángulo de fricción interna del suelo.

N: número de golpes por cada 30 cm de penetración del ensayo SPT.

N1: número de golpes corregido.

Se ha aplicado una corrección a los valores de N debido al efecto de la sobrecarga, aplicando la fórmula que propusieron Seed *et al.* (1984). Esta corrección tiene en cuenta la influencia de la carga adicional sobre los valores de N:

$$N1 = N \times CN$$

Donde:

N: resistencia a la penetración estándar normalizada.

CN: factor de ajuste utilizado para estandarizar la resistencia a la penetración a un esfuerzo de sobrecarga efectiva de 1 Kg/cm<sup>2</sup>.

En contraste, Liao y Whitman (1985) exponen una técnica alternativa para calcular tal factor. Esta fórmula proporciona una manera diferente de ajustar los valores de N teniendo en cuenta la carga adicional aplicada:

$$C_N = \sqrt{\frac{1}{\sigma_0}}$$

Donde:

$\sigma_0$ : esfuerzo efectivo vertical inicial en Kg/cm<sup>2</sup> y  $CN \leq 2.0$

De acuerdo a los resultados de los ensayos de SPT, se obtuvieron los siguientes valores para los materiales de relave grueso y relave fino:

Relave grueso – SM:  $N_{prom} = 14.32 \rightarrow \phi = 31.9^\circ$

Relave fino – CL-ML:  $N_{prom} = 4.25 \rightarrow \phi = 24.2^\circ$

Para evaluar los materiales de la costra de relave grueso oxidado (SM) de la superficie inclinada y el terreno de cimentación de los depósitos de relave compuesto por conglomerado cuaternario de matriz granular (GP), se tomaron muestras directamente para su evaluación. Estas muestras fueron sometidas a ensayos de compresión triaxial en laboratorio, y se obtuvieron los valores que se muestran en el siguiente resumen de los ensayos de campo y laboratorio.

En la Tabla 3 se presentan las propiedades geotécnicas de los materiales de la sección crítica (Perfil 1-1) investigada y evaluada, las cuales serán utilizadas en el análisis de los depósitos de relave.

**Tabla 3**

*Parámetros geotécnicos para la sección crítica analizada (Perfil 1-1)*

Estrato	Clasificación SUCS	Índice de Plasticidad IP	Peso Unitario $\gamma$		Cohesión $c'$		Ángulo de fricción $\phi'$ (°)	Velocidad de ondas Vp (m/s)	Velocidad de ondas Vs (m/s)
			Tn/m <sup>3</sup>	kN/m <sup>3</sup>	Kg/cm <sup>2</sup>	kPa			
Costra de Relave Grueso Oxidado	SM	3.0	1.85	18.1	0.05	4.9	33.0	650	328
Relave Grueso	SM	0.0	1.73	17.0	0.00	0.0	31.9	650	328
Relave Fino	CL-ML	7.0	1.69	16.6	0.10	9.8	24.2	610	296
Conglomerado de Matriz Granular	GP	0.0	1.94	19.0	0.00	0.0	38.0	910	484

En la Tabla 3 se presentan también los valores resumidos de los parámetros de peso unitario ( $\gamma$ ), cohesión ( $c'$ ) y ángulo de fricción ( $\phi'$ ) para los estratos de los depósitos de relave que serán analizados. Estos valores se alcanzaron con base en las pruebas de campo y laboratorio realizados en los puntos de exploración geotécnica de este trabajo de investigación. Además, se complementaron con las pruebas de campo y laboratorio realizados para el informe técnico del Plan de Cierre de Pasivos del Depósito de Relaves Ticapampa, elaborado por la Compañía Minera Yahuarcocha S.A. Para cada estrato identificado, se seleccionaron los parámetros más críticos de los puntos de investigación y se realizaron las correspondientes comparaciones y ajustes entre los análisis de laboratorio y campo.

### Parámetros dinámicos de los depósitos de relave

Mediante el uso de métodos geofísicos sísmicos, como el ensayo de refracción sísmica realizado en nuestra investigación geotécnica de campo, se señala la velocidad de propagación de las ondas sísmicas compresionales ( $V_p$ ) y las ondas sísmicas de corte ( $V_s$ ).

Estos valores de  $V_p$  y  $V_s$  a lo largo de los estratos del depósito de relave permiten calcular el módulo de corte ( $G$ ), el módulo de elasticidad ( $E$ ) y la relación de Poisson ( $\nu$ ). Para obtener estos parámetros a partir de las velocidades de ondas  $V_p$  y  $V_s$ , se utilizan las siguientes expresiones, que se derivan de la teoría de la elasticidad.

$$\nu = \frac{\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}{2\left(\frac{V_p}{V_s}\right)^2 - 2}$$

$$V_s = \frac{V_p}{\sqrt{\frac{1 - 2\nu}{2(1 - \nu)}}}$$

$$G_{\max} = \rho V_s^2 = \frac{\gamma}{g} V_s^2$$

$$E = 2G(1 + \nu)$$

Los parámetros geotécnicos proporcionados en la Tabla 3 y las ecuaciones correspondientes se utilizaron para calcular los parámetros dinámicos de los depósitos de relave en la sección crítica de análisis (Perfil 1-1). La Tabla 4 muestra de manera resumida estos parámetros geotécnicos y dinámicos, los cuales serán utilizados en la presente investigación para el análisis dinámico mediante el software Quake/W 2007.



La Tabla 4 resume la caracterización geotécnica de los depósitos de relave, la cual se basa en los trabajos y ensayos realizados en campo y laboratorio para los diferentes estratos de materiales que conforman los depósitos de relave abandonados en Ticapampa, específicamente en la sección crítica (Perfil 1-1) seleccionada para el análisis.

**Tabla 4**

*Parámetros geotécnicos y dinámicos de la sección crítica (Perfil 1-1)*

Estrato	Clasificación SUCS	Peso Unitario y kN/m <sup>3</sup>	Cohesión c' kPa	Ángulo de Fricción Ø'°	Velocidad de propagación de ondas sísmicas		Relación de Poisson v	Módulo de Corte G kPa	Módulo de Elasticidad E KPa
					Vp m/s	Vs m/s			
Costra de Relave Grueso Oxidado	SM	18.1	4.9	33.0	650	328	0.329	198962	528916
Relave Grueso	SM	17.0	0.0	31.9	650	328	0.329	186057	494608
Relave Fino	CL-ML	16.6	9.8	24.2	610	296	0.346	148020	398474
Conglomerado de Matriz Granular	GP	19.0	0.0	38.0	910	484	0.303	454301	1183694

Utilizando los parámetros geotécnicos y dinámicos de la Tabla 4 y el *software* Quake/W 2007, se generaron las propiedades relacionadas con la rigidez de los materiales. Esto incluye las curvas de función de G<sub>máx</sub>, las curvas de función de reducción de G y las curvas de función de amortiguamiento (ξ), como se muestra en las Figuras 26, 27, 28, 29, 30 y 31 para los materiales de relave grueso y relave fino, respectivamente.

Asimismo, se obtuvieron los parámetros necesarios para el análisis de licuación, incluyendo la curva de función de la relación de presión de poros (ru) y la curva de función del número cíclico y la relación de corte cíclico CSR, como se muestra en las Figuras 32, 33, 34 y 35 para los materiales de relave grueso y relave fino, respectivamente.

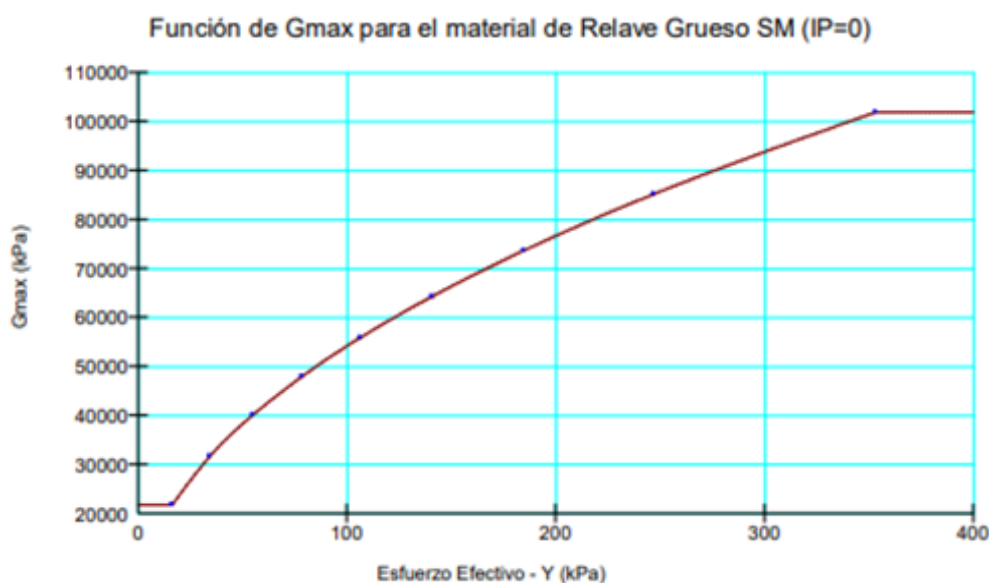
Estas curvas, que representan las propiedades relacionadas con la rigidez de los materiales, se obtienen al ingresar los datos de los parámetros geotécnicos y dinámicos en el programa, como se muestra en la Figura 38. El programa utiliza las ecuaciones de análisis del *software* Quake/W 2007 para generar estas curvas de función específicas para los materiales de relave grueso y relave fino.

En el modelamiento geométrico presentado en la Figura 37, se consideran las condiciones de la sección crítica analizada. El programa genera los valores necesarios para determinar los parámetros requeridos para las propiedades relacionadas con la rigidez de los materiales, según la ubicación de cada estrato. El programa inicialmente utiliza valores predeterminados de acuerdo con las ecuaciones

definidas, los cuales se calibran específicamente para cada tipo de material ingresado al programa. Esto permite obtener las curvas de función necesarias para el análisis dinámico sísmico. A continuación, se presentan las curvas resultantes del análisis para los estratos de la sección crítica (Perfil 1-1) de los depósitos de relave en Ticapampa:

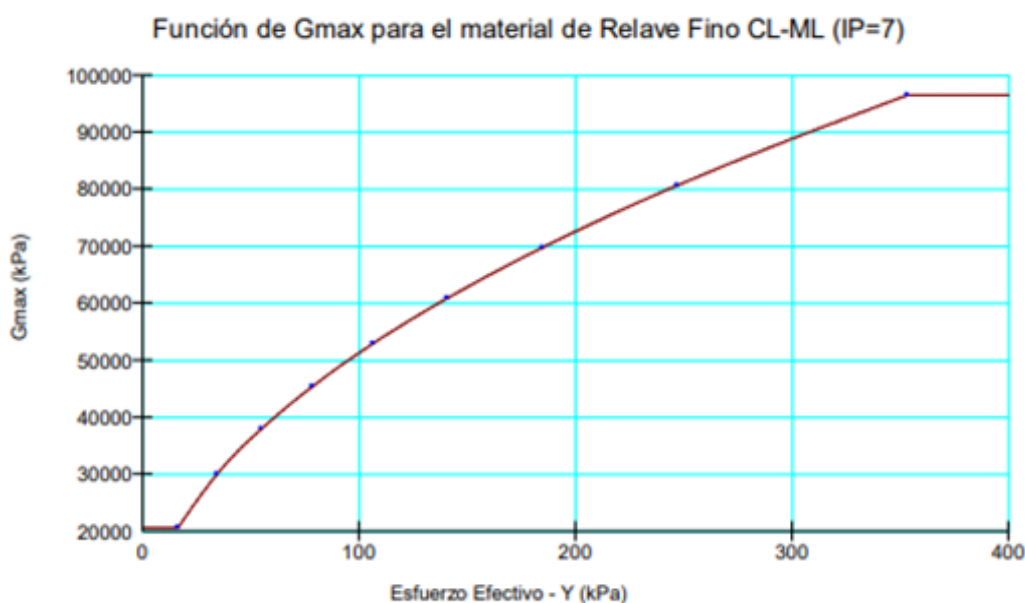
### Figura 26

*Función típica de  $G_{max}$ , obtenido para el análisis dinámico mediante el uso del programa Quake/W para el estrato de material de relave grueso SM con  $IP=0$*



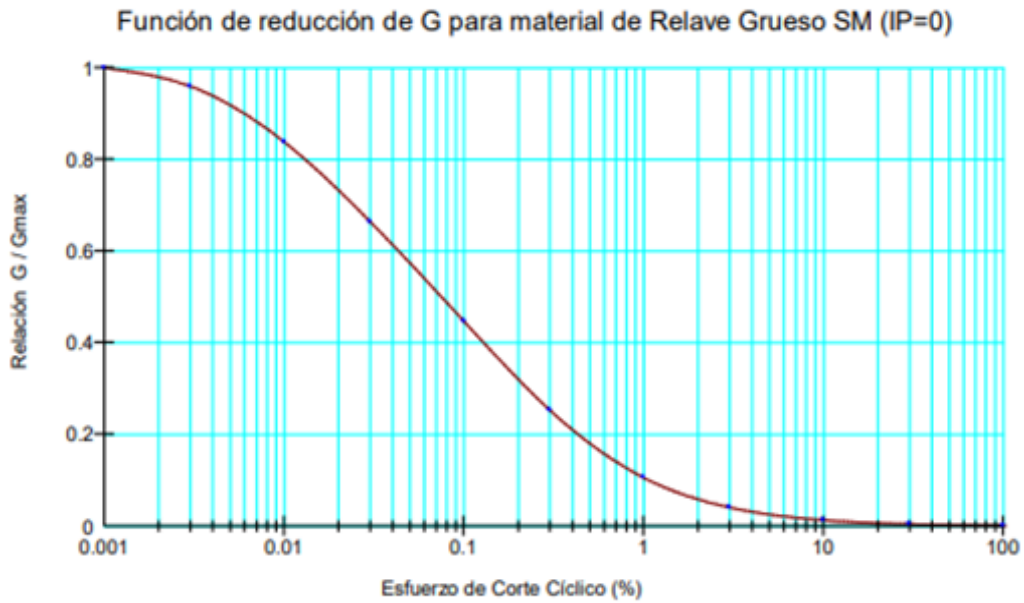
### Figura 27

*Función típica de  $G_{max}$ , obtenido para el análisis dinámico mediante el uso del programa Quake/W para el estrato de material de relave fino CL-ML con  $IP=7$*



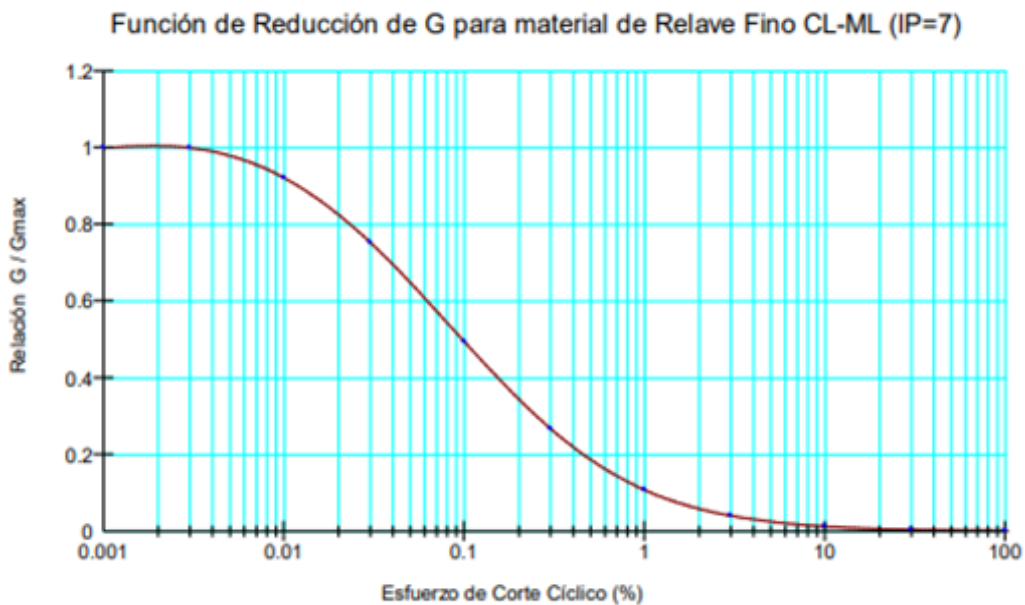
### Figura 28

Función de reducción de  $G$ , obtenido para el análisis dinámico mediante el uso del programa *Quake/W* para el estrato de material de relave grueso SM con  $IP=0$



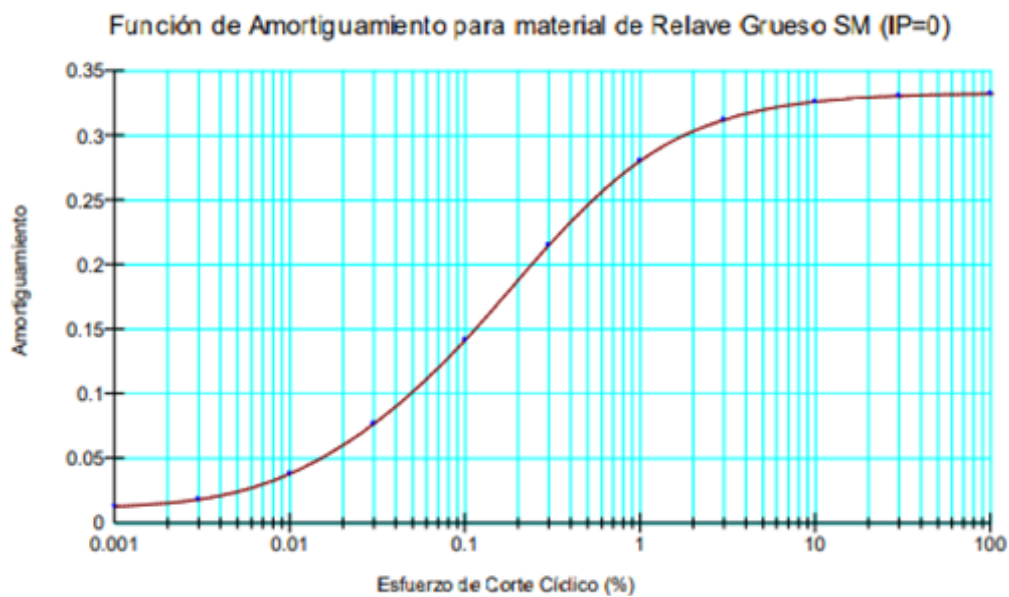
### Figura 29

Función de reducción de  $G$ , obtenido para el análisis dinámico mediante el uso del programa *Quake/W* para el estrato de material de relave fino CL-ML con  $IP=7$



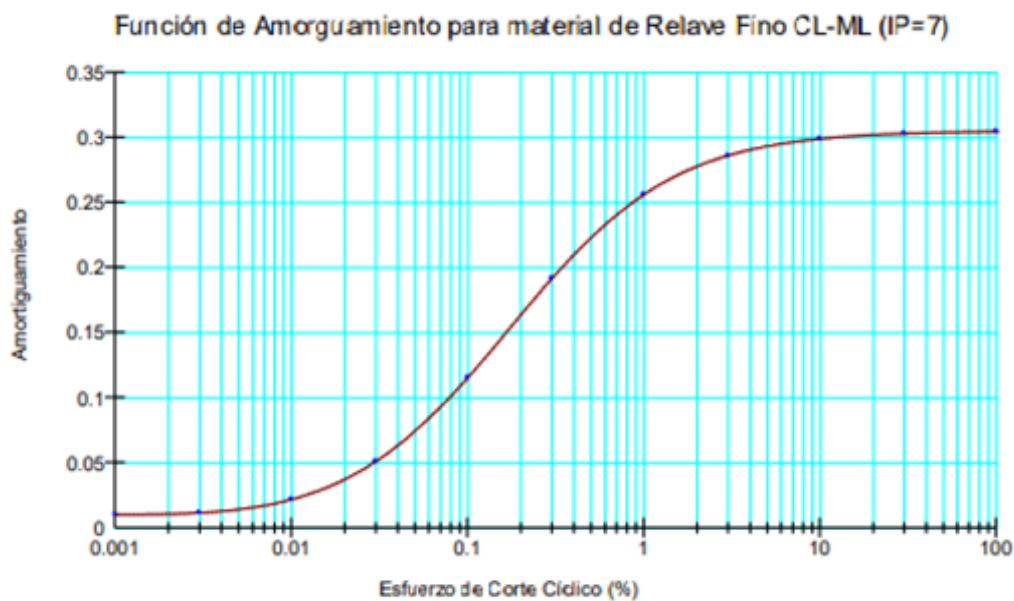
### Figura 30

Función de amortiguamiento, obtenido para el análisis dinámico mediante el uso del programa *Quake/W* para el estrato de material de relave grueso SM con  $IP=0$



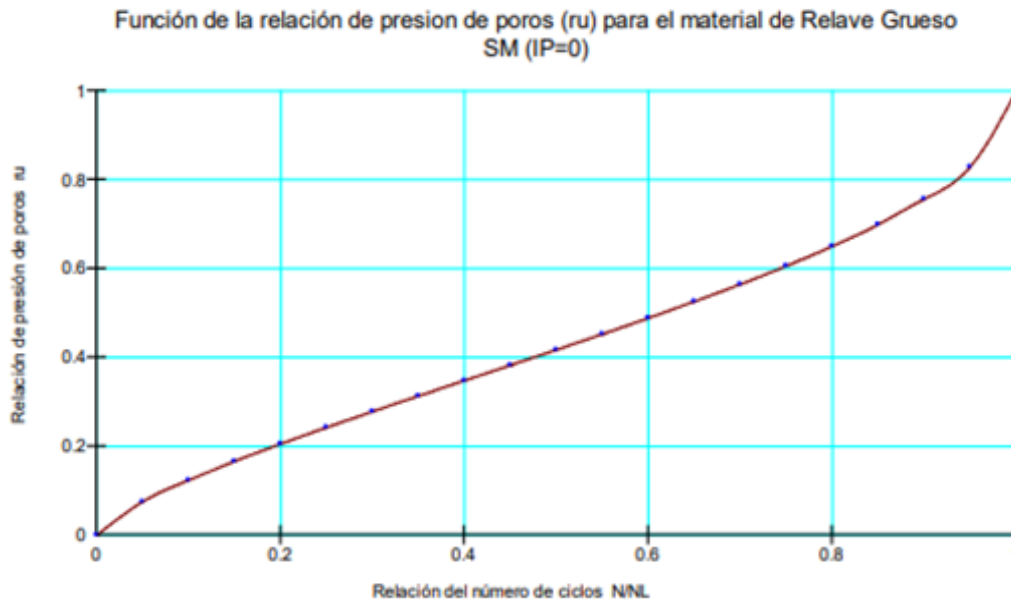
### Figura 31

Función de amortiguamiento, obtenido para el análisis dinámico mediante el uso del programa *Quake/W* para el estrato de material de relave fino CL-ML con  $IP=7$



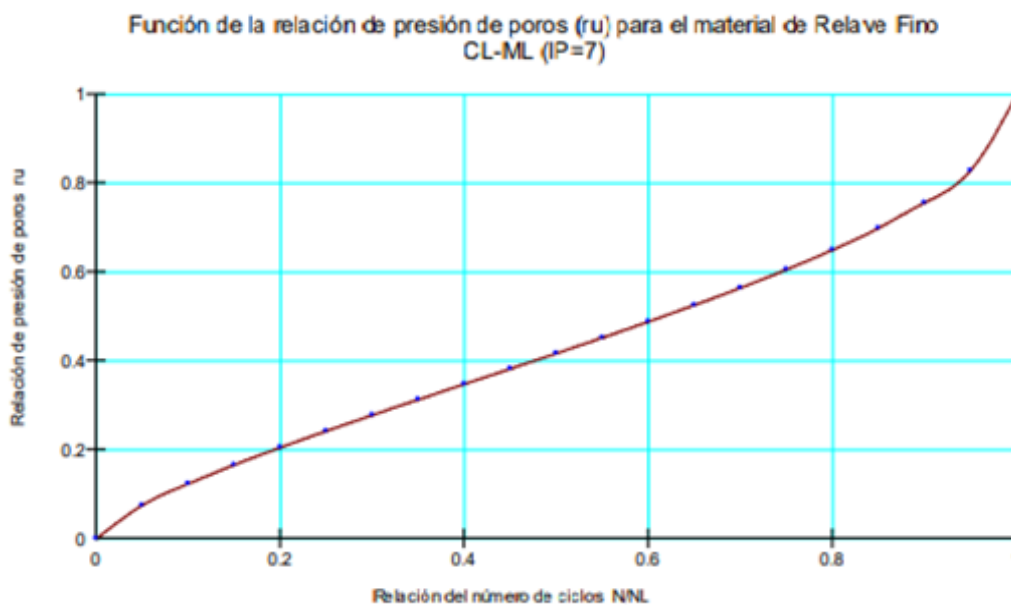
### Figura 32

Función de la relación de presión de poros ( $ru$ ), obtenido para el estrato de material de relave grueso SM con  $IP=0$



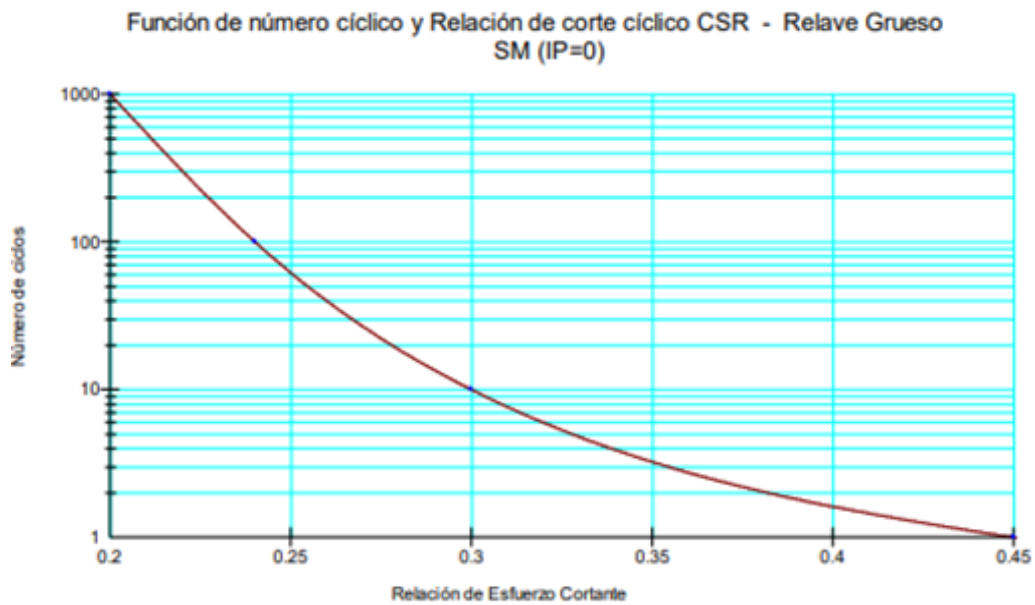
### Figura 33

Función de la relación de presión de poros ( $ru$ ), obtenido para el estrato de material de relave fino CL-ML con  $IP=7$



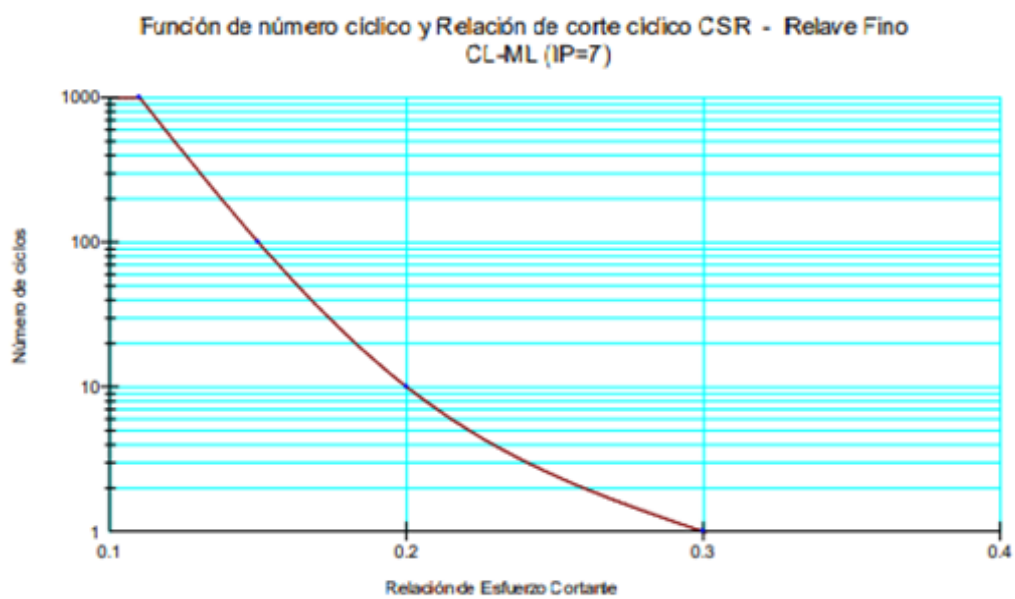
### Figura 34

Función de número cíclico y relación de corte cíclico CSR, obtenido para el estrato de material de relave grueso SM con  $IP=0$



### Figura 35

Función de número cíclico y relación de corte cíclico CSR, obtenido para el estrato de material de relave fino CL-ML con  $IP=7$





Capítulo IV

**Evaluación bidimensional  
del comportamiento  
sísmico geotécnico de  
estabilidad de los  
depósitos de  
relave en  
abandono en  
Ticapampa,  
río Santa**

El análisis dinámico de la respuesta esfuerzo-deformación tiene sus orígenes en la evaluación de la estabilidad de presas. Los primeros intentos sistemáticos fueron realizados por Newmark, y posteriormente complementados por Seed e Idriss (1969). Estas investigaciones sentaron las bases para desarrollar un procedimiento de diseño adecuado en la evaluación de la estabilidad física de las presas. Siguiendo este enfoque, se ejecutó un análisis bidimensional del comportamiento sísmico-geotécnico de los depósitos de relave abandonados en Ticapampa.

Para su ejercicio, se tuvieron en cuenta los rasgos de los bastos compuestos en los depósitos de relave, las cuales se mencionaron en el capítulo anterior. Además, se requirió realizar una subdivisión del talud y seleccionar una formulación matemática adecuada para obtener los resultados precisos ante los eventos sísmicos.

Al detallar la formulación y realizar el análisis con la ayuda de un programa informático, en este caso el Quake/W 2007, se presentan los hallazgos y se lleva a cabo su discusión.

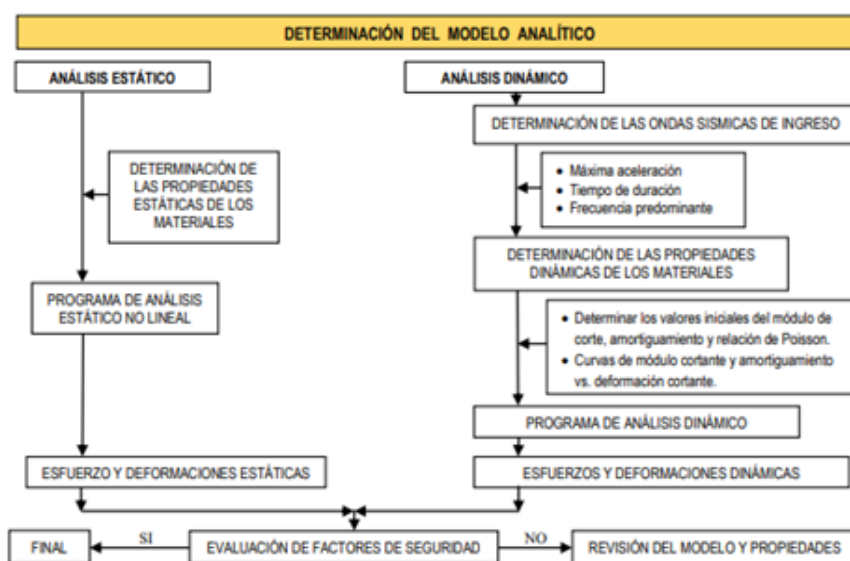
### Modelamiento geométrico y numérico

En el análisis de la respuesta ante los movimientos sísmicos dinámica de los taludes de los depósitos de relave abandonados en Ticapampa, se emplearon expresiones matemáticas y analíticas. Este proceso se dividió en dos pasos esenciales: el modelado geométrico del talud y el modelado numérico.

El modelado geométrico consistió en representar la estructura del talud mediante partición del medio continuo con una rejilla de elementos finitos. En este proceso se consideraron las condiciones de frontera y se realizó una zonificación de los diferentes tipos de materiales presentes en el talud. Por otro lado, el modelado numérico se enfocó en calcular valores numéricos a través de modelos constitutivos apropiados, como el Elástico Lineal o el Lineal Equivalente. Estos modelos representaron la procedencia de los bastos y permitieron la resolución de las fórmulas fundamentales en el análisis estático y dinámico. Para llevar a cabo estos cálculos, se emplearon exposiciones numéricas específicas. El diagrama del método abarcado en este estudio se visualiza en la Figura 36.

**Figura 36**

*Representación esquemática de la evaluación de la sección crítica, siguiendo una metodología analítica*





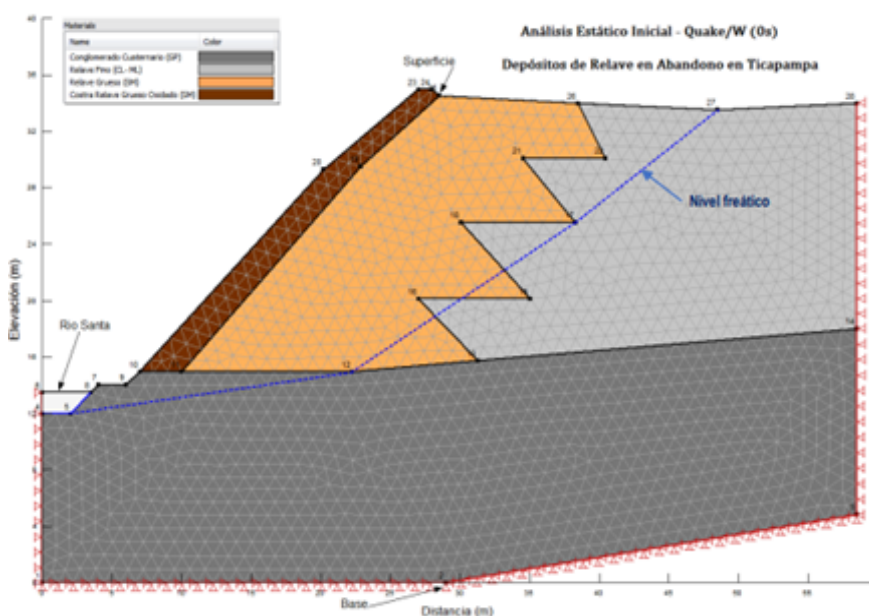
### Modelamiento geométrico

El modelado geométrico de los taludes implica representar la estructura mediante una malla de elementos finitos, lo cual requiere la idealización de una región y la consideración de las condiciones de borde. Estas condiciones pueden clasificarse en límites finitos y semiinfinitos. La condición de frontera finita emula que la ubicación de la estructura en un dominio limitado, donde los bordes inferiores están limitados por un material altamente rígido que impide cualquier tipo de desplazamiento. Por otro lado, la condición de bordes semi infinitos implica truncar la malla a una distancia considerable para simular una aproximación al infinito. En este estudio, se ha optado por considerar la condición de bordes finitos en el modelado geométrico de los taludes.

El modelado geométrico se ha llevado a cabo utilizando el *software* Quake/W 2007, específicamente para la sección crítica (Perfil 1-1) del depósito de relaves abandonado en Ticapampa. Se han empleado mallas compuestas por elementos triangulares, y se ha seguido el criterio de dimensionar el modelo de acuerdo a la Figura 23, obtenida a partir de la caracterización geotécnica de los depósitos de relaves. El diseño de la malla ha considerado la homogeneidad, la concordancia y el tamaño adecuado de cada elemento para garantizar una representación fiel de la estructura. La Figura 37 muestra el resultado del modelado geométrico realizado en el programa Quake/W 2007.

### Figura 37

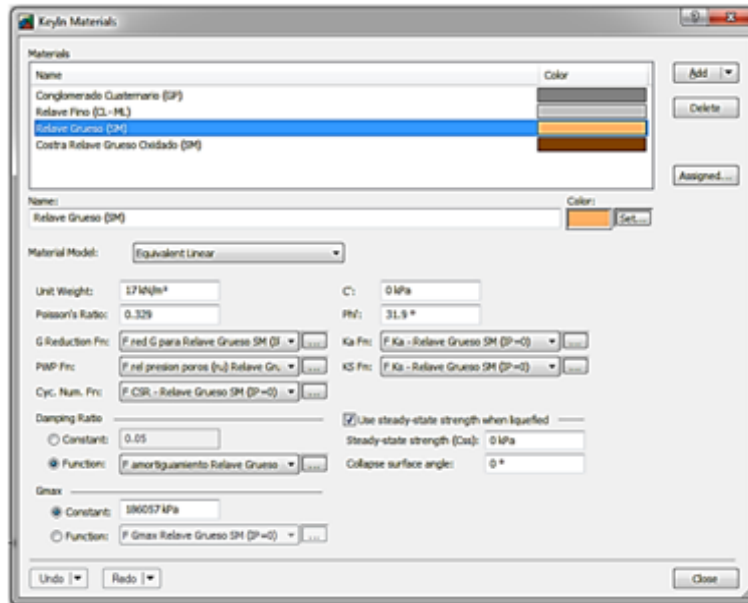
Modelamiento geométrico en el Quake/W 2007, de la sección crítica (Perfil 1-1) analizada para los Depósitos de Relave en Ticapampa



La Figura 38 presenta la incorporación de los parámetros geotécnicos y dinámicos en el proceso de modelado geométrico llevado a cabo en el *software* Quake/W 2007. Estos valores se han obtenido específicamente para los estratos correspondientes a la sección crítica (Perfil 1-1), tal como se detalla en la Tabla 4 del capítulo previo.

**Figura 38**

*Ingreso de parámetros geotécnicos y dinámicos al modelamiento geométrico en el Quake/W 2007, de los estratos de la sección crítica (Perfil 1-1)*



### *Modelamiento numérico*

La simulación numérica se puede clasificar en dos categorías: análisis estático y análisis dinámico. A continuación, se presentan en detalle los modelos empleados para cada uno de estos propósitos.

### *Modelamiento numérico para el análisis estático*

El análisis estático de estructuras geotécnicas mediante elementos finitos ha sido ampliamente descrito en la literatura, por lo que en esta exposición solo se presentan las características fundamentales del procedimiento, sin entrar en detalles específicos.

La teoría de elementos finitos se basa en la representación idealizada de las estructuras geotécnicas mediante la conexión de elementos en sus nodos. En el análisis bidimensional de esfuerzo-deformación, se utilizan convenientemente elementos triangulares o cuadrangulares para representar la estructura, asegurando la concordancia entre los bordes de los elementos contiguos.

En dicha metodología, se considera que las deformaciones en cada partícula cambian de forma lineal tanto en dirección vertical como horizontal. Con base en esta suposición, se pueden estimar las características de dureza de los elementos, como las fuerzas y desplazamientos nodales. Luego, la matriz de rigidez  $[K]$  de toda la estructura se obtiene mediante la combinación de los coeficientes adecuados de dureza en cada aspecto conectado a un nodo en específico.

Asimismo, se cuenta con un vector  $\{r\}$  que representa los desplazamientos de todos los nodos en el ensamblaje, y un vector correspondiente a las fuerzas nodales  $\{R\}$ . La fórmula presenta la matriz de rigidez de la estructura  $[K]$ , obtenida mediante la incorporación de las rigideces de los elementos finitos.

$$\{R\} = [K]\{r\}$$

En un análisis convencional de elementos finitos basado en elasticidad, se resuelven las ecuaciones de equilibrio lineales mediante el desplazamiento de nodos, los cuales se obtienen al aplicar fuerzas en ellos. A partir de estos desplazamientos de nodos, se determinan los esfuerzos en todos los elementos  $\{\sigma\}$  mediante la matriz de transformación  $[S]$ .

$$\{\sigma\} = [S]\{r\}$$

Diversos investigadores han señalado que la precisión de los resultados está influenciada por la forma determinada para los valores mecánicos y, en menor medida, del método utilizado para añadir dichos rasgos en la formulación numérica. Por lo tanto, es necesario enfocarse en mejorar la determinación experimental de campo y laboratorio de los valores mecánicos, así como en la posterior selección de módulos adecuados.

En términos generales, las leyes constitutivas o formulaciones matemáticas son instrumentos que posibilitan emular la conducta física de la materia y de los medios en continua. Estos modelos desempeñan un papel fundamental al proporcionar resultados confiables en el análisis de estructuras, especialmente en cálculos avanzados utilizando métodos modernos como diferencias finitas y elementos finitos.

Es importante destacar que el uso de una ley constitutiva inapropiada en un procedimiento numérico puede limitar la fiabilidad de los resultados obtenidos. Existen diferentes tipos de modelos constitutivos, entre ellos los siguientes enfoques de módulo: constante o lineal, variables (modelo hiperbólico) y elastoplástico.

Los modelos constitutivos ofrecen una representación matemática de la conducta del material, la cual se deriva de pruebas realizadas en laboratorio o en campo, teniendo en cuenta factores relevantes que influyen en tal conducta. Estas expresiones matemáticas establecen la correlación entre la tensión y la desproporción de un material.

Los modelos constitutivos del suelo se clasifican según su linealidad, considerando modelos lineales y no lineales, y según su elasticidad, plasticidad o elastoplasticidad, dependiendo de si solo se considera la deformación elástica, plástica o ambas en el modelo.

Al generar deformaciones mediante las fuerzas externas y no superar el límite estimado, se considera que el material es de modelo lineal elástico. En este sentido, se retiran las cargas y desaparecen las deformaciones. Este modelo supone que la materia mantiene una homogeneidad. Por otro lado, el modelo elástico no lineal implica que los parámetros elásticos varían en función del estado esfuerzo-deformación del suelo.

El modelo hiperbólico asume que las curvas esfuerzo-deformación se pueden aproximar mediante hipérbolas, lo cual proporciona una representación más precisa de la respuesta mecánica del suelo (Liu, 1995). Sin embargo, este modelo tiene limitaciones en la predicción precisa de la transformación de volumen tras el alcance del máximo esfuerzo cortante por el suelo. Además, su carácter monótono

creciente dificultad señalar el estado de tensión en el suelo en plena transformación que ablanda (Chi y Kushwaha, 1988).

En el modelo elastoplástico, la asociación esfuerzo-deformación del suelo emite una complejidad y es no lineal. La deformación es elástica cuando el suelo recupera su estado inicial al retirar la carga aplicada, mientras que adopta plasticidad cuando se expresa una permanencia en la deformación. Dado que el suelo experimenta deformaciones considerables bajo carga, es necesario considerar esta característica en la ley constitutiva.

Los modelos de plasticidad superan la restricción de deformación en permanencia cuando se someten a carga. La teoría de la plasticidad se desarrolló con la finalidad de dictaminar una respuesta automatizada de metales bajo tensión en consideración con los límites elásticos. Considerando esta teoría, se diseñaron modelos que estiman deformaciones irreversibles, polímeros y materiales geotécnicos (Helwany, 2007).

Independientemente del método elegido, es necesario tener en cuenta consideraciones como la enunciación matemática, la caracterización de medidas reveladores, su alcance con base en pruebas de laboratorio, la elección de data coherente observada para la determinación de las medidas, la comprobación y valoración asociados al problema de borde.

En el contexto de esta investigación, se ha optado por examinar el comportamiento estático utilizando un modelo lineal elástico.

#### *Modelo elástico lineal*

El modelo matemático utilizado en ingeniería, basado en la ley de Hooke, es una representación simplificada que se aplica únicamente a un conjunto limitado de materiales con comportamiento elástico. Sin embargo, la mayoría de los materiales son no lineales y complejos, lo que limita la aplicabilidad de este modelo.

En el análisis de la respuesta no lineal, la influencia de diversos factores como el estado de esfuerzos, los esfuerzos residuales, el cambio de volumen bajo corte, la historia de esfuerzos o trayectoria, la anisotropía y el cambio de estado físico y flujo en los poros, se vuelve especialmente relevante. Estos factores influyen en la respuesta del material y pueden afectar significativamente los resultados de los análisis numéricos.

El modelo elastoplástico desarrollado por Desai y Siriwardane considera que la resistencia al deslizamiento del suelo sobre un material aumenta linealmente con el incremento del desplazamiento relativo entre las superficies, hasta alcanzar un valor máximo. Después de este punto, se produce una deformación plástica perfectamente estable, y la resistencia al deslizamiento permanece constante a medida que aumenta el desplazamiento relativo.

El estado de esfuerzos se refiere a los esfuerzos primarios presentes en una formación geológica antes de ser alterada por actividades humanas, mientras que los esfuerzos residuales son los que permanecen en un suelo sin someterlo a esfuerzos externos después de un proceso, lo que provoca deformaciones permanentes en algunas partes del sólido.

El cambio de volumen bajo corte está relacionado con el índice de vacíos y su disminución con el aumento del esfuerzo efectivo normal. Todos los suelos alcanzan un valor crítico de índice de vacíos, en el cual la deformación angular continúa sin cambios en el esfuerzo cortante y el volumen hasta que ocurre la falla.

La historia de esfuerzos o trayectoria de esfuerzos se utiliza como una simplificación en lugar de la trayectoria de esfuerzos máximos cortantes. Representa la línea que une los puntos que representan los esfuerzos máximos cortantes y los correspondientes esfuerzos normales durante un ensayo de compresión triaxial. Estos valores están definidos en un plano cartesiano de coordenadas  $(p, q)$  en función de los esfuerzos principales  $(\sigma_1 \text{ y } \sigma_3)$ .

La anisotropía de los suelos puede ser inherente, debido a las características de los granos durante su formación geológica, o inducida, causada por cambios de esfuerzos posteriores a la formación del suelo. La anisotropía inducida puede ser resultado de diferentes esfuerzos aplicados en direcciones horizontal y vertical.

Los factores de cambio de estado físico y flujo en los poros tienen influencia en la formulación de las ecuaciones de conservación de la cantidad de movimiento y la masa, en términos de los desplazamientos del suelo y el potencial de presión neutra en el fluido.

La suposición de deformaciones infinitesimales facilita las ecuaciones que conservan el valor de movilidad y de la masa, al descomponer las deformaciones en componentes elásticas y plásticas. En el escenario de elementos finitos, esta suposición también resuelve el modelo de conservación de masa, dado que la transformación del volumen de la mezcla se convierte en una composición lineal de desplazamientos nodales, considerados parte de la fase sólida.

Estos factores influyen directamente en la réplica no lineal de las distribuciones geotécnicas, principalmente en la deformación finita del esqueleto del suelo y la plastificación. Las implicancias no lineales debido a estos factores impactan de modo crítico los alcances de los análisis numerales en consideraciones geotécnicas. Su impacto es especialmente indiscutible en arcillas blandas, donde se desarrollan movimientos con el tiempo debido a la consolidación y otros factores.

En resumen, el comportamiento de los materiales frente a cargas externas se expresa en conocimientos de deformación y tensión. En el caso de materiales elásticos, el estado de esfuerzos depende únicamente del estado de deformaciones, y en un constante de descarga y carga, la materia retoma su posición base. Esta relación empírica es conocida como la ley de Hooke:

$$\sigma = E\varepsilon$$

En la ecuación dada, el símbolo  $\sigma$  se refiere al esfuerzo normal,  $\varepsilon$  representa la deformación axial, y  $E$  corresponde al módulo de Young.

#### *Modelamiento numérico para el análisis dinámico*

Como se señaló previamente, se utilizó la teoría de elementos finitos en el análisis estático, y se seguirá el mismo enfoque para el análisis dinámico. En este caso, se procede a desarrollar la ecuación de movimiento para evaluar la respuesta dinámica, que se expresa mediante la siguiente formulación:

$$[M]\{\ddot{u}\} + [C]\{\dot{u}\} + [K]\{u\} = \{R(t)\}$$

La formulación matemática utilizada en el análisis dinámico se expresa mediante diferentes variables.  $[M]$  se refiere a la matriz de masa,  $\{\ddot{u}\}$  representa el vector de aceleraciones,  $[C]$  corresponde a la matriz de amortiguamiento,  $\{\dot{u}\}$  denota el vector de velocidades,  $[K]$  representa la matriz de rigidez,  $\{u\}$  representa el vector de desplazamientos nodales, y  $\{R(t)\}$  se refiere al vector de carga sísmica.

En el proceso de modelado numeral para el análisis dinámico, se requiere esgrimir eficientes modelos preparados en la simulación de la actuación del material. Esto implica establecer sus medidas dinámicas y emplear los modeladores expuestos anteriormente para resolver la ecuación planteada. El procedimiento de esta fórmula se obtiene a través de técnicas como la integración directa o la superposición nodal trayendo métodos integrativos como la propuesta de Wilson ( $\theta$ ) o el método de Newmark u otros. Quake/W es un programa manipulado en esta investigación y se utiliza el método integrativo de Wilson.

El método Wilson  $\theta$  (Wilson, 1968) se adapta de la propuesta de Newmark, la cual presenta una variación lineal de la prontitud desde el tiempo  $t_n$  al tiempo  $t_n + \theta \Delta t$ . Esta modificación permite mejorar la estabilidad incondicional del método de aceleración lineal propuesto por Newmark para problemas lineales. La introducción del factor  $\theta$  tiene como objetivo minimizar las oscilaciones falsas al evaluar un alcance numérico en el aumento de tiempo. Además, la aplicación del factor  $\theta$  ayuda a atenuar numéricamente dentro del sistema a favor de los modos más altos.

En el análisis dinámico, se deben seguir ciertos pasos. Primero, se deben obtener los estados de esfuerzos iniciales. Luego, se selecciona el modelo adecuado, correspondiente al lineal equivalente. A continuación, se determinan el módulo cortante, la deformación cortante efectiva y el amortiguamiento. Por último, se realiza la composición en el mando del tiempo. Este procedimiento será explicado en detalle:

#### *Estado inicial de esfuerzos*

El análisis sísmico preciso se realiza considerando un eficiente estado de esfuerzos iniciales, correspondiente a los esfuerzos finales alcanzados mediante el análisis estático. Los parámetros dinámicos de las materias promueven dicho resultado en dependencia del estado de esfuerzos. En específico, los depósitos de relave se apoyan de esfuerzos geoestáticos existentes.

#### *Método lineal equivalente*

Al deformar y cortar los materiales de estructura geotécnica, se resaltan sus impactos no lineales de relevancia y, como tal, son considerados en el análisis. Esta inquietud la aborda Seed e Idriss (1969). Asimismo, dichos autores abordan el concepto de modelo lineal equivalente, el cual consiste en obtener una solución aproximada no lineal a través del análisis lineal expuesto en rasgos de rigurosidad y contracción del suelo, considerando la compatibilidad con las estructuras deformadas en los puntos a considerar en el sistema.

Diversos investigadores, como Seed e Idriss (1970), Seed *et al.* (1984) y Sun *et al.* (1988), han publicado estudios relacionando estas propiedades con deformaciones compatibles para suelos

cohesivos y granulados. Los hallazgos en forma de curvas y módulo cortante se incorporan en el programa utilizando el método siguiente:

Tanto el módulo cortante como del amortiguamiento presentarán valores iniciales considerando cada elemento finito de la morfología del suelo. Luego, se analiza mediante sus propiedades, calculando su deformación cortante máxima en registro del lapso canalizado para la deformación de dichos elementos. Al brindar resultados, se alcanzan sus amplitudes y las de sus partes; además, se consultan las curvas correspondientes al material con el fin de verificar la compatibilidad del nivel de deformación de los alcances calculados. Si dicha compatibilidad no es expresada, se toman las estimaciones y se aplican en la siguiente iteración.

El procedimiento se repite en búsqueda de la convergencia que suele visualizarse dentro de 4 a 7 iteraciones. De estas, la última es considerada respuesta no lineal de la ecuación.

Los estudiosos de la Universidad de California emplearon el modelo lineal en programas como SHAKE, FLUSH y QUAD-4M, pero se atiende especialmente al GEO-SLOPE International Ltd. (Quake/W).

#### *Determinación del módulo cortante máximo*

La incorporación de las curvas de variación del módulo cortante proporcionadas por diferentes investigadores implica la necesidad de conocer previamente el valor máximo del módulo cortante. Para evaluar dicho parámetro, se manifiesta una variedad de estimaciones basadas en diferentes teorías: relaciones empíricas y criterio del módulo de descarga-recarga propuestas por Seed e Idriss (1970) y otras.

En el caso particular que se analiza, al utilizar el método del lineal equivalente, el software considera la siguiente relación empírica, que permite determinar:

$$G_{max} = 1000(K2_{max})(\sigma'_m)(\sigma'_m)^{1/2}$$

En la expresión mencionada,  $\sigma'_m$  se refiere al esfuerzo principal medio efectivo,  $K2_{max}$  representa la influencia del índice de vacíos y la amplitud de las deformaciones, y  $G_{max}$  es el máximo módulo cortante en unidades de lb/pie<sup>2</sup>.

Es importante destacar que para deformaciones muy pequeñas del orden de 10-4 %, se aplica el coeficiente ( $K2_{máx}$ ). Además, el esfuerzo principal medio se calcula con base en la fase de esfuerzos finales derivados del análisis estático antepuesto en condiciones de deformación plana, siguiendo el enfoque de

$$\sigma'_m = \frac{\sigma'_{xx} + \sigma'_{yy} + \sigma'_{zz}}{3}$$

$$\sigma'_{xx} = \nu(\sigma'_{yy} + \sigma'_{zz})$$

En la ecuación mencionada, los símbolos  $\sigma'_{xx}$ ,  $\sigma'_{yy}$  y  $\sigma'_{zz}$  corresponden a los esfuerzos efectivos estáticos, mientras que  $\nu$  representa la relación de Poisson.

### *Deformación cortante efectiva*

En el método lineal equivalente, se considera una amplitud de deformación cortante efectiva, la cual se asume como:

$$\gamma_{ef} = 0.65|\gamma_{max}|$$

La deformación cortante efectiva ( $\gamma_{ef}$ ) se determina como el 65 % de la deformación cortante máxima ( $|\gamma_{max}|$ ), que corresponde al valor máximo registrado en el historial de deformaciones cortantes en cada intervalo de tiempo. El valor 0.65 utilizado en esta relación es establecido de manera empírica (Seed e Idriss, 1970).

Dado que las curvas de los materiales presentan una inclinación moderada, el resultado final no es sensible a variaciones moderadas de este factor. Se ha observado que cambios en la inclinación de las deformaciones cortantes máximas de aproximadamente  $\pm 10\%$  no afectan significativamente el resultado. Para evaluar la deformación cortante máxima, existen dos enfoques básicos, uno en el dominio del tiempo y otro en el dominio de la frecuencia.

### **Análisis bidimensional de respuesta dinámica de los depósitos de relave**

La evaluación de la respuesta dinámica del suelo se realiza a través de diversas metodologías, siendo el análisis unidimensional una de las más utilizadas. Sin embargo, esta aproximación resulta limitada en casos donde se encuentran superficies con topografía irregular y geología especial. En tales situaciones, es más apropiado emplear un análisis bidimensional o incluso tridimensional. Por lo tanto, para el estudio de los depósitos de relave en abandono en Ticapampa, se optó por realizar un análisis bidimensional utilizando el software *Quake/W 2007*.

Mediante este *software*, se evaluó el comportamiento sísmico geotécnico utilizando el método de elementos finitos bidimensionales y el método lineal equivalente. Se examinó la respuesta de la estructura geotécnica ante el sismo del 31-05-1970, y se obtuvieron resultados relevantes como los excesos de presión de poro, las resistencias post-sísmicas, las deformaciones permanentes y las posibles zonas de licuación en la estructura analizada. Estos resultados proporcionan una comprensión general del comportamiento de la estructura durante y después del sismo, así como el impacto de este en su estabilidad.

A continuación, se presenta el proceso llevado a cabo en la sección crítica (Perfil 1-1) de los depósitos de relave. Se detallan los parámetros utilizados tanto en la fase estática como dinámica, se presentan los resultados obtenidos y, finalmente, se realiza una discusión sobre estos.

#### *Análisis estático inicial con Quake/W 2007*

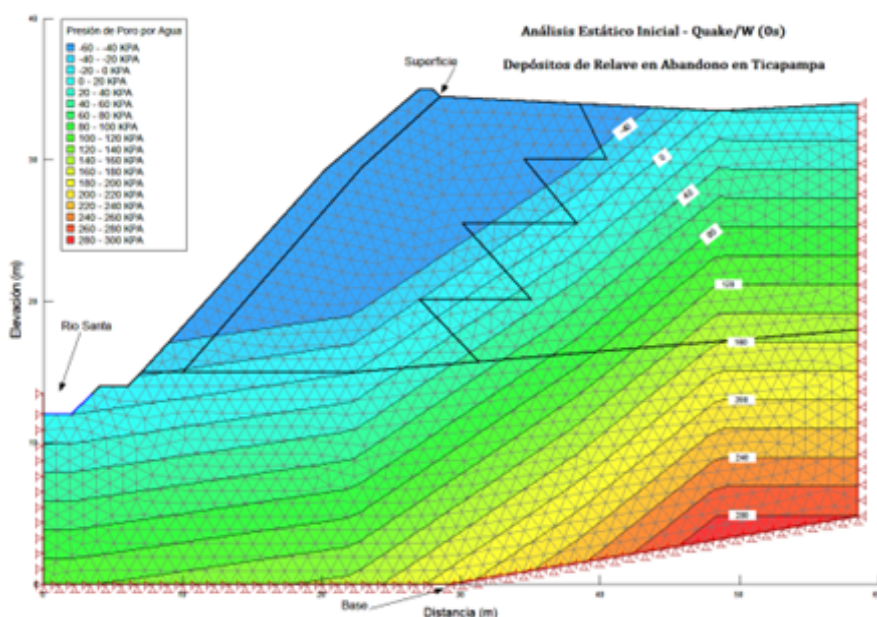
El primer paso consiste en determinar los esfuerzos estáticos iniciales generados por el peso de la estructura geotécnica (depósitos de relave) debido al sismo. Para esto, se obtienen los esfuerzos estáticos iniciales, que se muestran en las Figuras 39, 40 y 41, correspondientes a la presión de poro del agua, los esfuerzos verticales totales y los esfuerzos efectivos en kPa en la sección crítica de los depósitos de relave.



Una forma de verificar rápidamente estos resultados iniciales es multiplicar el peso específico del material por la profundidad deseada para obtener el esfuerzo estático inicial. Los resultados de este análisis se incluirán en el resumen informativo del análisis bidimensional, evaluando la condición actual de los depósitos de relave.

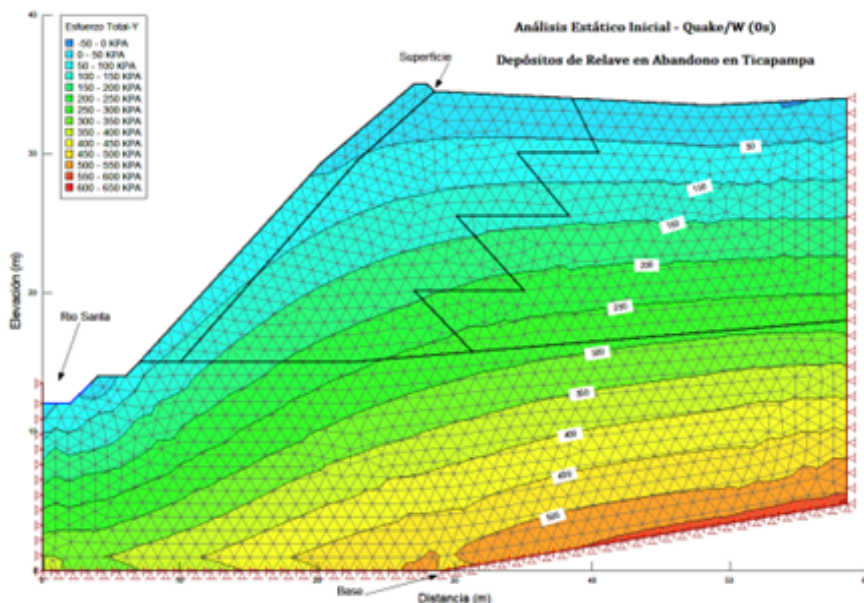
### Figura 39

Presión de poro del agua del análisis estático inicial en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa



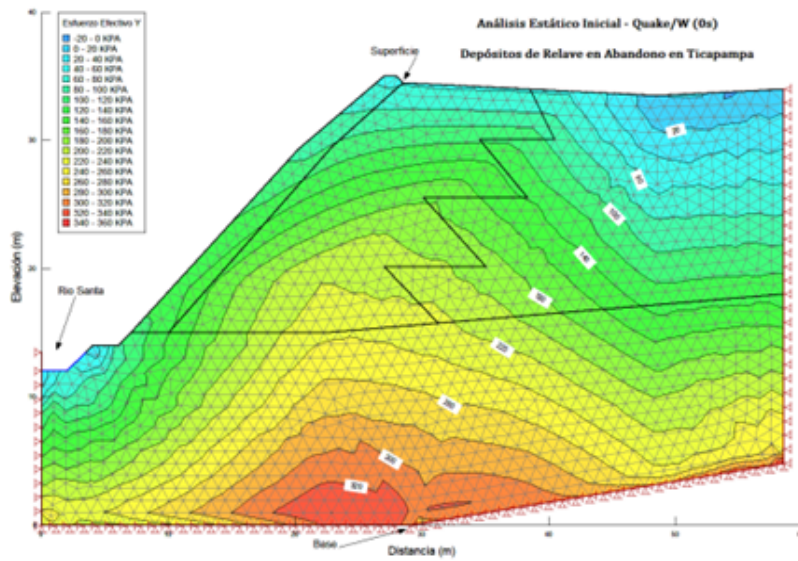
### Figura 40

Esfuerzos verticales totales del análisis estático inicial en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa



**Figura 41**

*Esfuerzos efectivos del análisis estático inicial en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa*



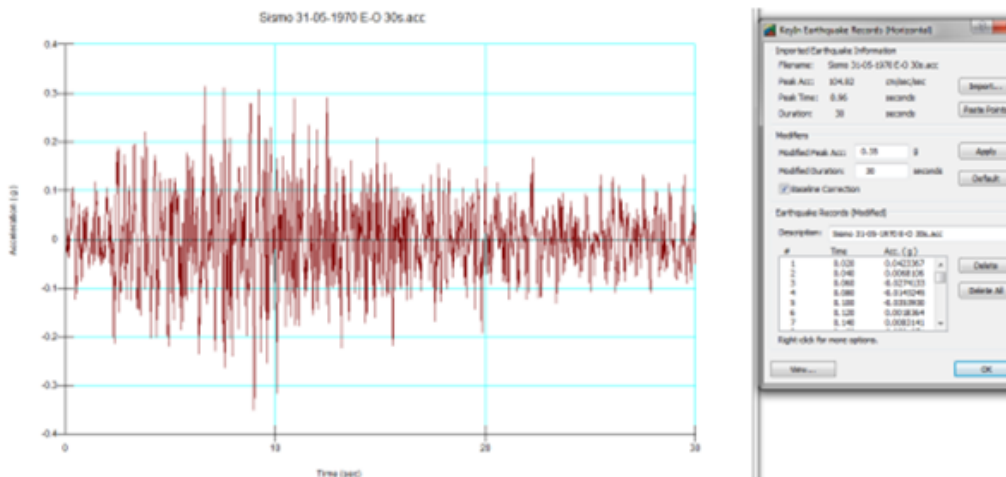
*Análisis dinámico sísmico con Quake/W 2007*

Se utilizó el registro sísmico de aceleraciones del sismo del 31-05-1970 E-O 30 s, el cual se muestra en la Figura 42, para aplicar cargas al modelo evaluado. El registro sísmico fue escalado a una aceleración de 0.35 g, conforme a lo analizado en el capítulo anterior sobre la sismicidad. Esto permitió generar distribuciones de esfuerzos en la estructura para cada paso de tiempo del registro aplicado.

El paso de tiempo utilizado fue de 0.02 segundos, de acuerdo al archivo del acelerograma del sismo del 31-05-1970 E-O mostrado en la Figura 17. Se generaron los datos correspondientes a la Figura 42 utilizando el paso de tiempo mencionado. Considerando la duración total de 30 segundos del sismo mencionado, se realizaron un total de 1500 pasos de tiempo para llevar a cabo el análisis dinámico sísmico en el programa.

**Figura 42**

*Registro sísmico de aceleraciones del sismo del 31-05-1970 E-O 30s escalado a la aceleración de 0.35 g*

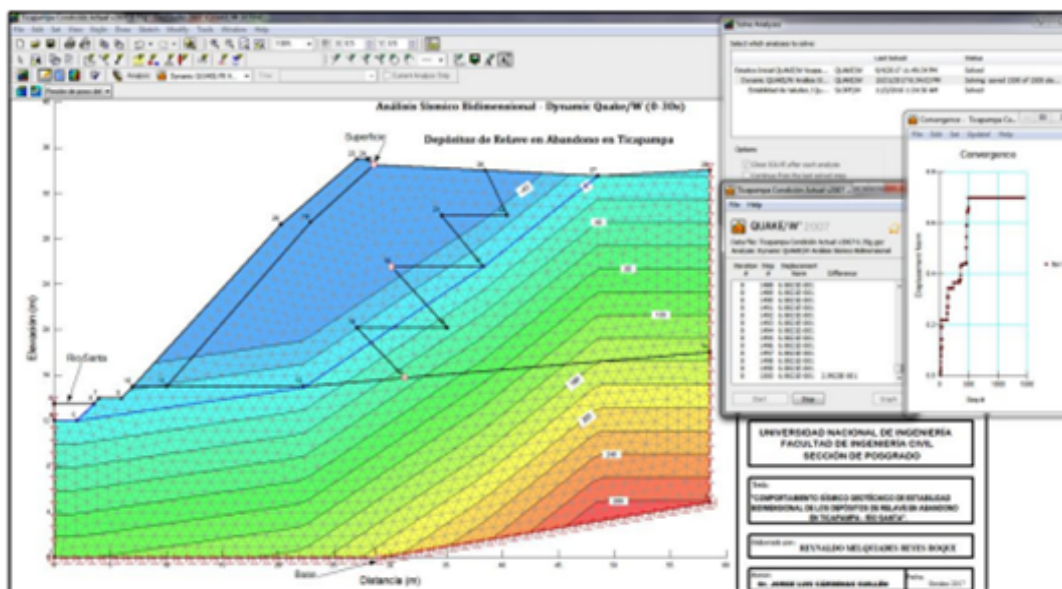


Utilizando el *software* Quake/W 2007, es posible generar gráficas de aceleración (velocidad, desplazamiento, etc.) en nodos seleccionados previamente, conocidos como nodos históricos, a lo largo del tiempo. Estas gráficas permiten verificar la convergencia del modelo resuelto, ya que los nodos históricos en una misma línea vertical deberían mostrar gráficas de aceleración vs. tiempo similares en términos de forma, aunque con magnitudes diferentes.

Además, Quake/W 2007 proporciona la capacidad de identificar posibles zonas de licuación en el modelo analizado, considerando la presencia de la napa freática en los depósitos de relave. En el modelo geométrico, se han colocado cuatro nodos, uno en la base, otro en la superficie y dos nodos intermedios en los estratos de los depósitos de relave. En la Figura 43 se muestra la convergencia obtenida en la octava iteración durante el análisis dinámico sísmico de la sección crítica evaluada.

**Figura 43**

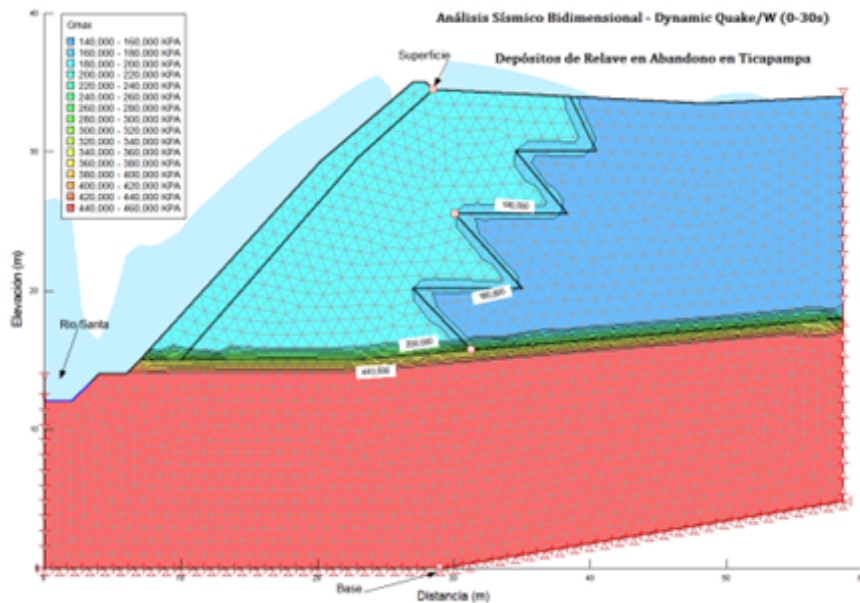
*Convergencia de análisis dinámico con Quake/W 2007 en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa-río Santa*



Los resultados de las propiedades dinámicas obtenidas en el análisis dinámico de los estratos del depósito de relave en abandono se presentan en las Figuras 44, 45 y 46. Estas figuras muestran las siguientes propiedades dinámicas respectivamente: la máxima rigidez  $G_{\max}$ , la rigidez equivalente ( $G$  equivalente), la relación de Poisson ( $\nu$ ) y la relación de amortiguamiento ( $\xi$ ). Estos parámetros dinámicos se obtienen después de realizar iteraciones utilizando el registro sísmico analizado, lo cual permite llevar a cabo una evaluación bidimensional adecuada del comportamiento sísmico geotécnico y la estabilidad de los depósitos de relave en abandono en Ticapampa.

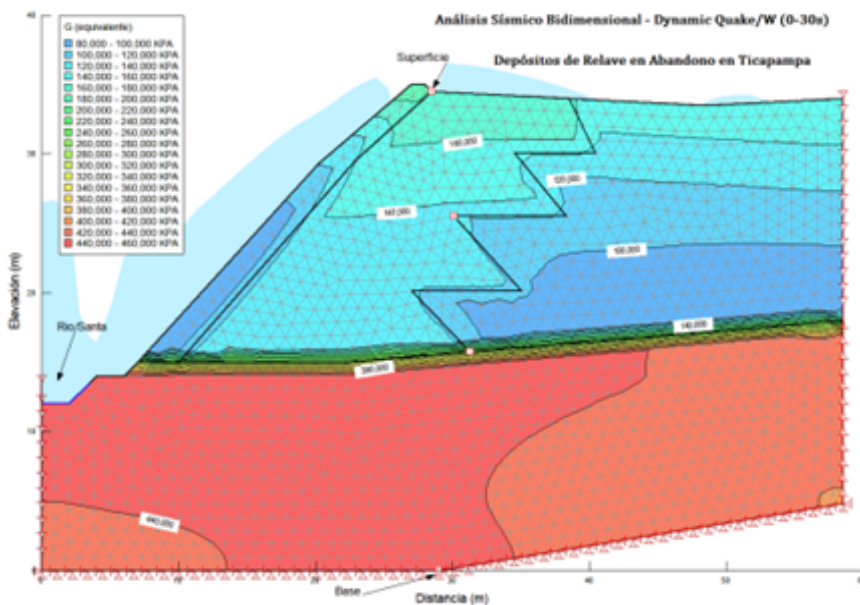
**Figura 44**

Propiedades dinámicas- $g_{m\acute{a}x}$ , del análisis dinámico en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa



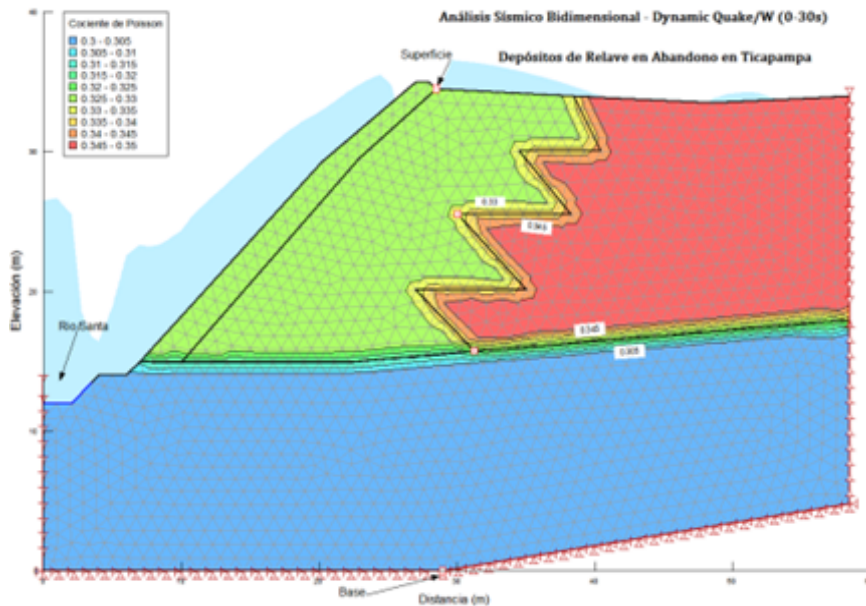
**Figura 45**

Propiedades dinámicas-G (equivalente), del análisis dinámico en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa



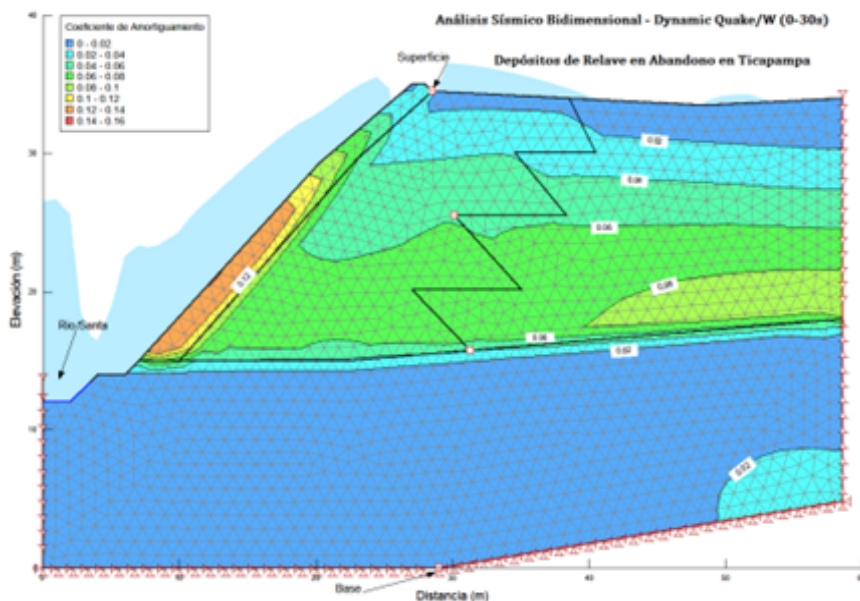
**Figura 46**

*Propiedades dinámicas-relación de Poisson, del análisis dinámico en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa*



**Figura 47**

*Propiedades dinámicas-relación de amortiguamiento, del análisis dinámico en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa*

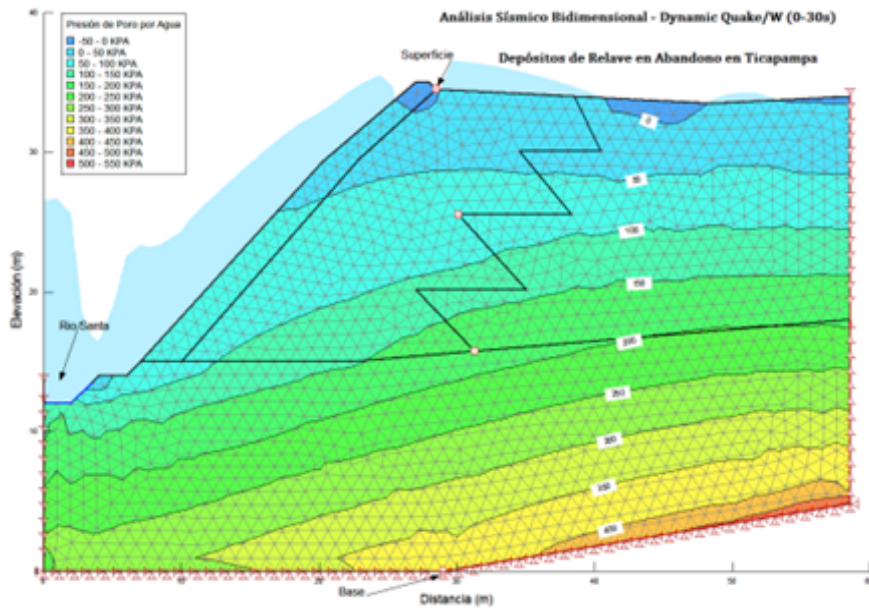


Después de que el programa Quake/W 2007 haya llevado a cabo el análisis de las propiedades dinámicas, tales como  $G_{\max}$ , Gequivalente, relación de Poisson ( $\nu$ ) y relación de amortiguamiento ( $\xi$ ), utilizando las funciones de amortiguamiento presentadas en las Figuras 23, 24, 25, 26, 27 y 28, junto con la aplicación del registro sísmico de aceleraciones del sismo del 31-05-1970 E-O 30s, escalado a una aceleración de 0.35g (Figura 42), se obtiene como resultado el análisis del comportamiento sísmico geotécnico.

En las Figuras 48, 49 y 50 se presentan los resultados obtenidos para la presión de poros, esfuerzo vertical total y esfuerzo efectivo del análisis dinámico en la sección crítica. Estas figuras ilustran las modificaciones que se producen en el comportamiento dinámico de los estratos de los depósitos de relave en abandono en comparación con el análisis estático inicial (Figuras 39, 40 y 41).

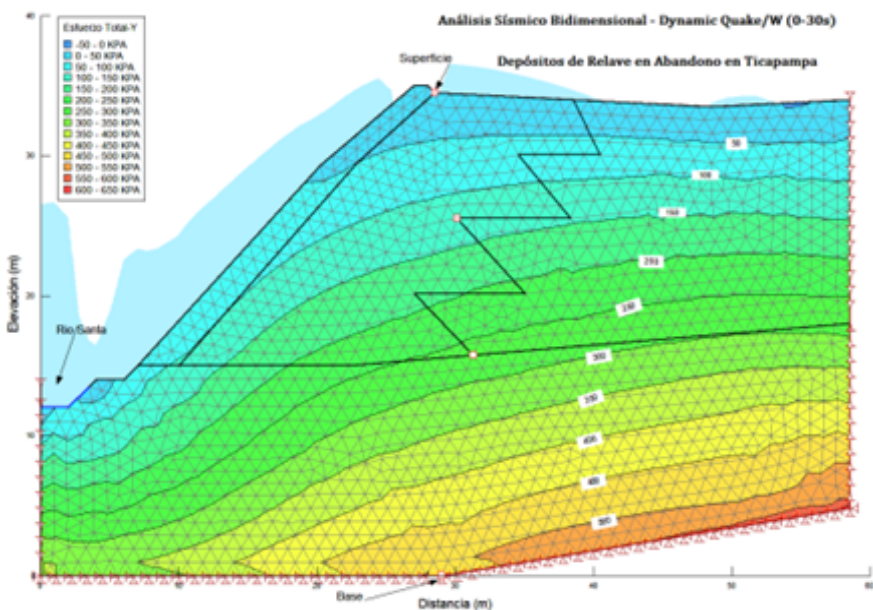
**Figura 48**

*Presión de poros del agua del análisis dinámico en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa*



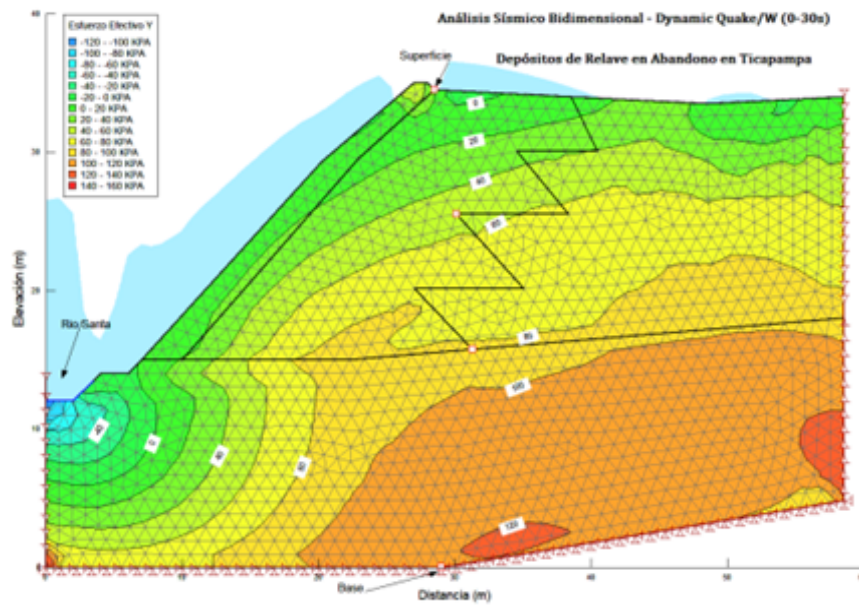
**Figura 49**

*Esfuerzos verticales totales del análisis dinámico en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa*



## Figura 50

Esfuerzos efectivos del análisis dinámico en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa



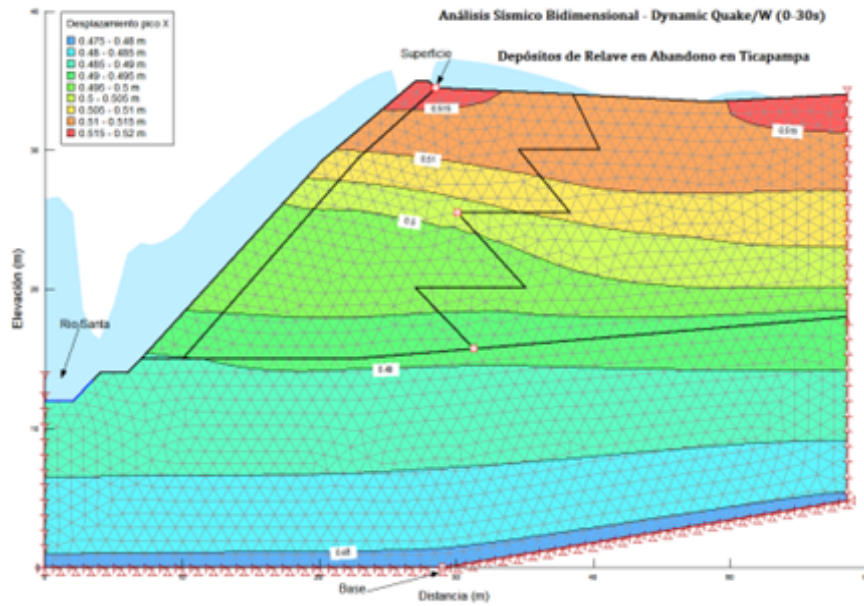
En relación con la presión de poros del agua, se produce una alteración en el gráfico del análisis estático inicial, debido al impacto del sismo, lo cual conlleva a un aumento en estas presiones. En el análisis dinámico, se observa una significativa modificación de la presión de poros del agua, manifestándose el nivel freático de manera superficial y solo en ciertos tramos del depósito de relave.

En cuanto a las gráficas del esfuerzo total, se evidencia una similitud en las presiones entre el análisis estático inicial y el análisis dinámico. Sin embargo, en el caso del esfuerzo efectivo, se observa una presión nula principalmente en la base del talud del depósito de relave en el análisis dinámico, además de que las presiones presentan mayor variabilidad y disminuyen en comparación con las presiones más uniformes del análisis estático inicial. Estas variaciones en las gráficas de presiones entre ambos análisis son resultado del movimiento generado por el impacto sísmico, ocasionando mayores deformaciones en la estructura geotécnica. Estos efectos se reflejan en los siguientes resultados que se analizan.

En las Figuras 51, 52, 53, 54 y 55 se representan los desplazamientos registrados entre la base y la superficie de los depósitos de relave.

### Figura 51

Desplazamientos obtenidos del análisis dinámico en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa



### Figura 52

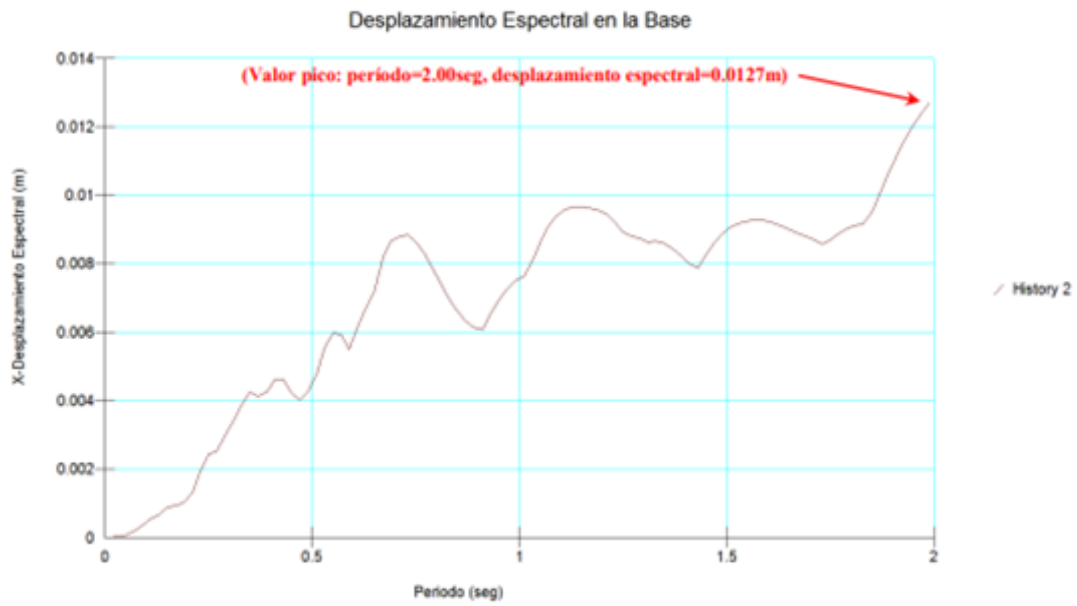
Desplazamiento-tiempo historia en la base de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa





**Figura 53**

Desplazamiento espectral en la base de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa



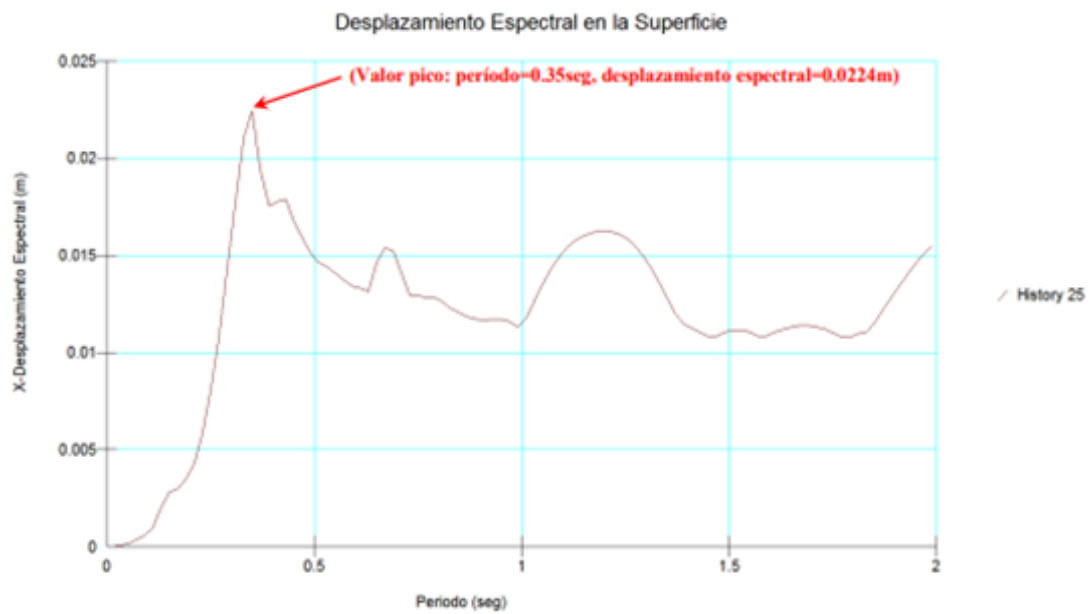
**Figura 54**

Desplazamiento-tiempo historia en la superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa



**Figura 55**

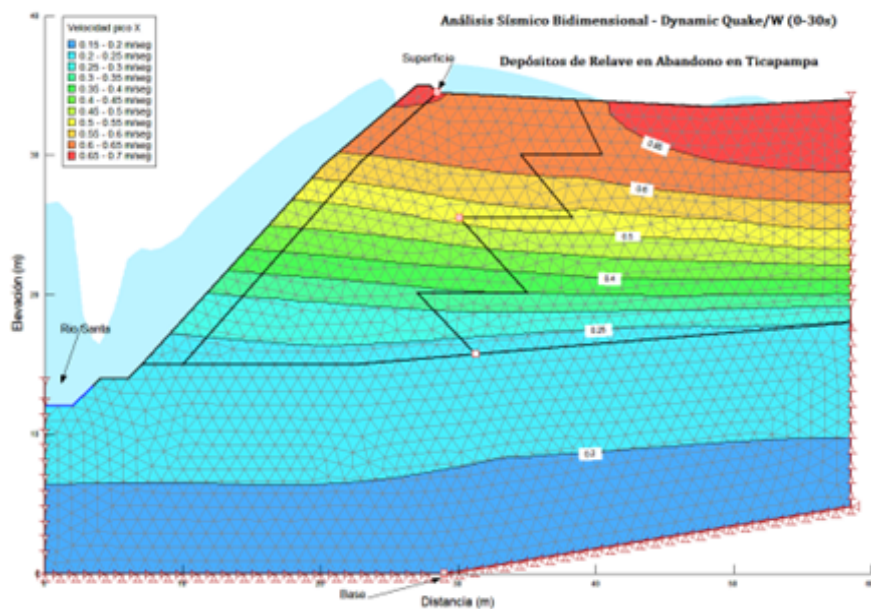
*Desplazamiento espectral en la superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa*



En las Figuras 56, 57, 58, 59 y 60 se enseñan las mediciones de velocidad registradas tanto en la base como en la superficie de los depósitos de relave.

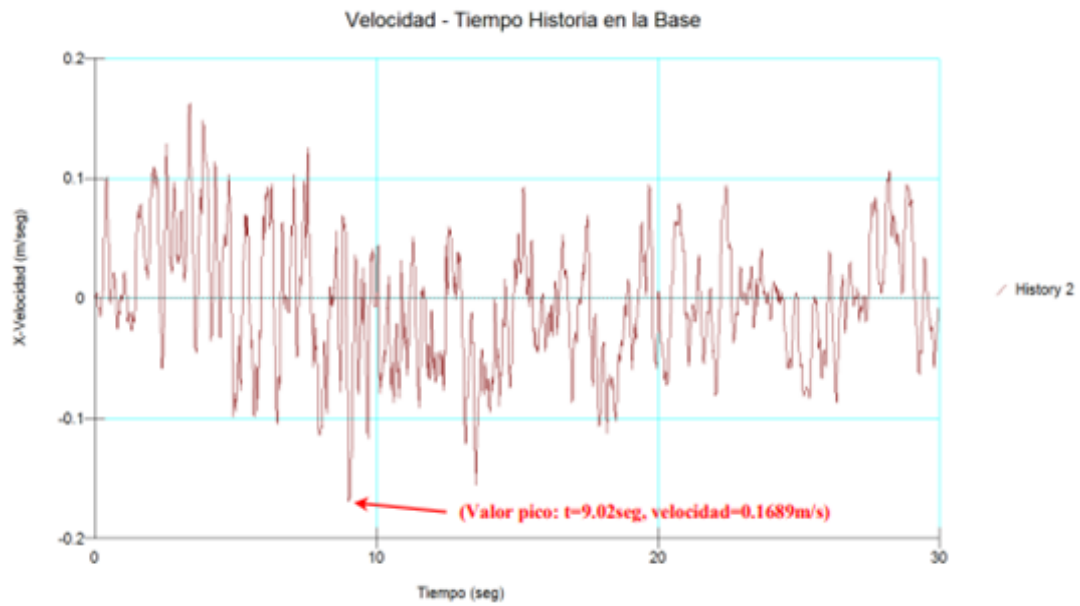
**Figura 56**

*Velocidades obtenidos del análisis dinámico en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa*



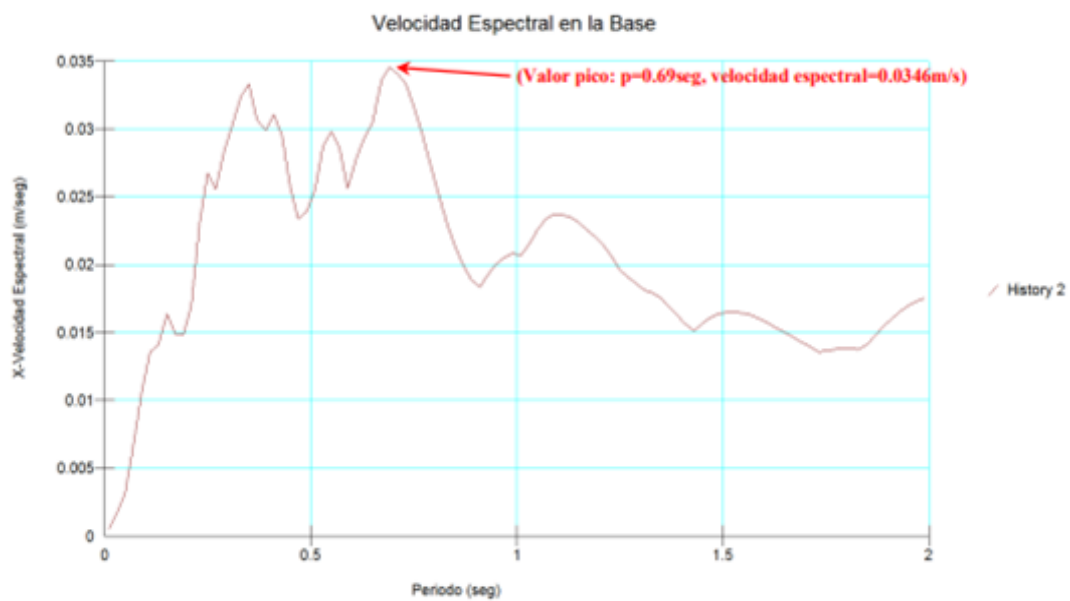
**Figura 57**

Velocidad-tiempo historia en la base de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa



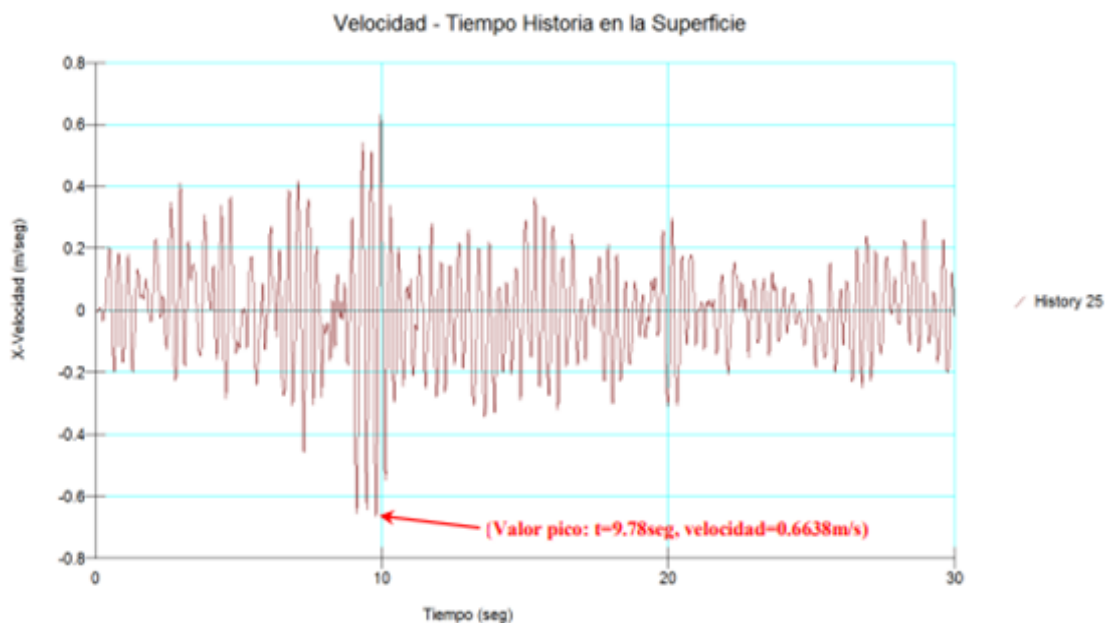
**Figura 58**

Velocidad espectral en la base de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa



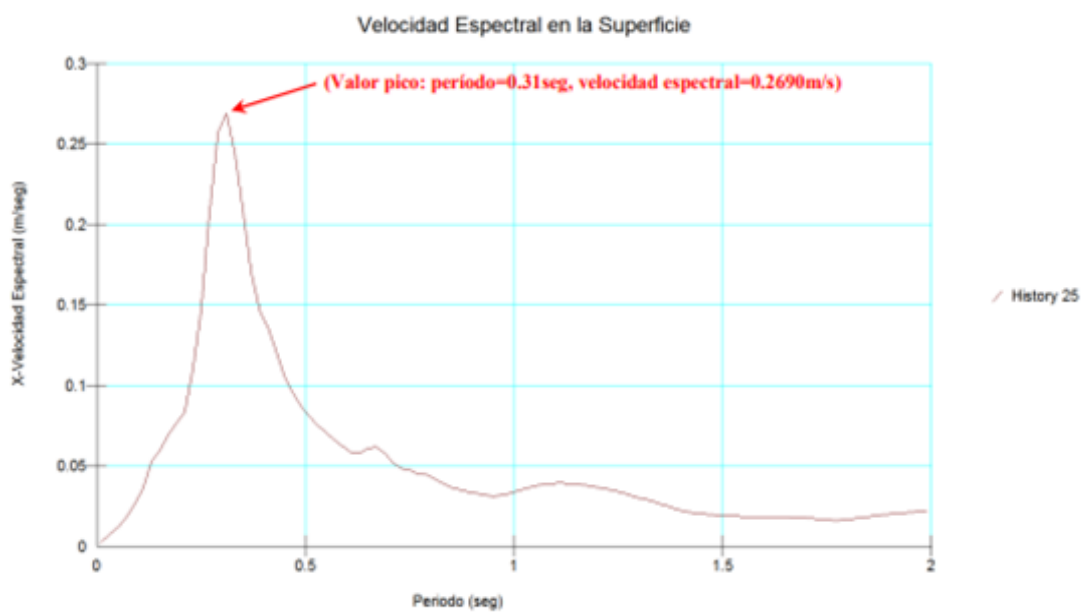
**Figura 59**

Velocidad-tiempo historia en la superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa.



**Figura 60**

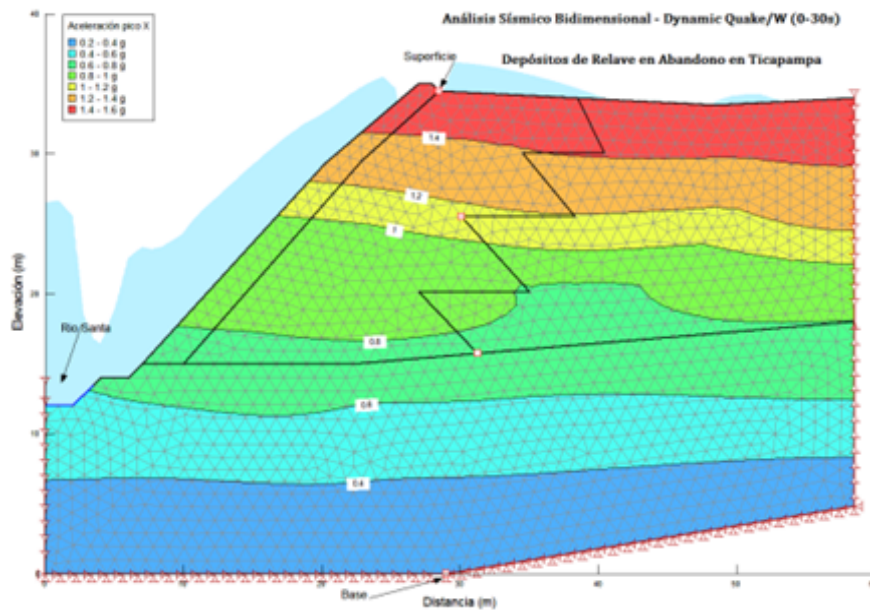
Velocidad espectral en la superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa



En las Figuras 61, 62, 63, 64 y 65 se exponen las mediciones de aceleración registradas tanto en la base como en la superficie de los depósitos de relave.

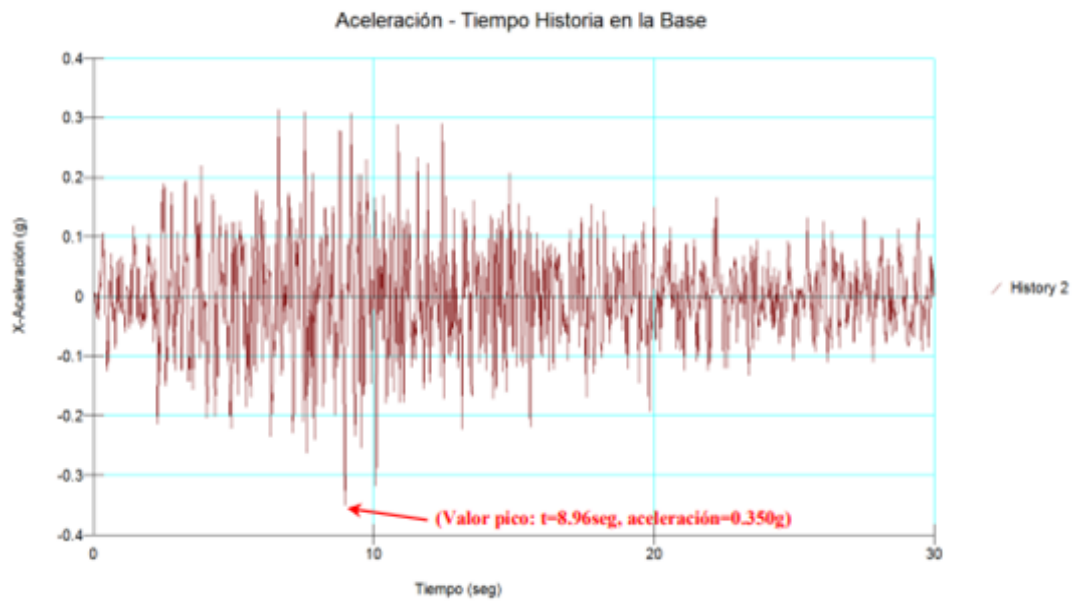
**Figura 61**

*Aceleraciones obtenidos del análisis dinámico en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa*



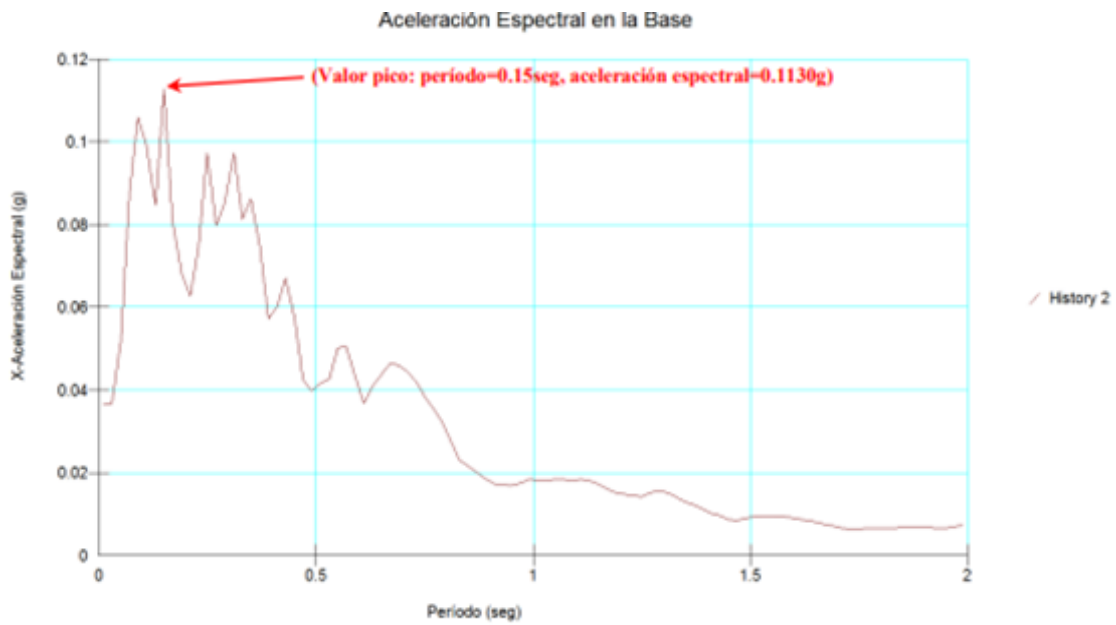
**Figura 62**

*Aceleración-tiempo historia en la base de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa*



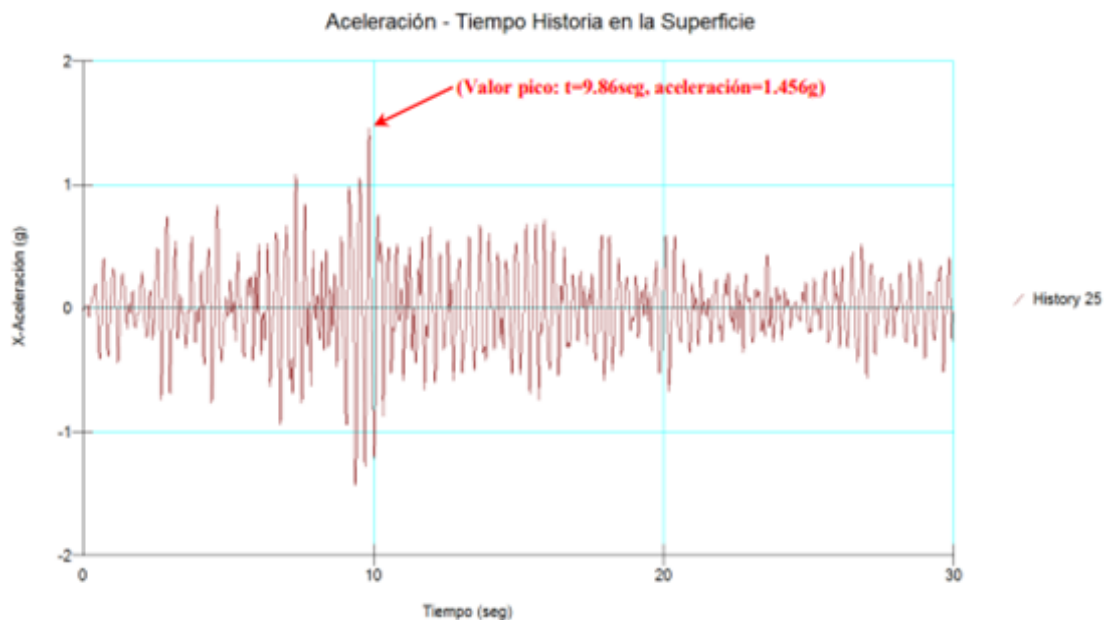
**Figura 63**

*Aceleración espectral en la base de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa*



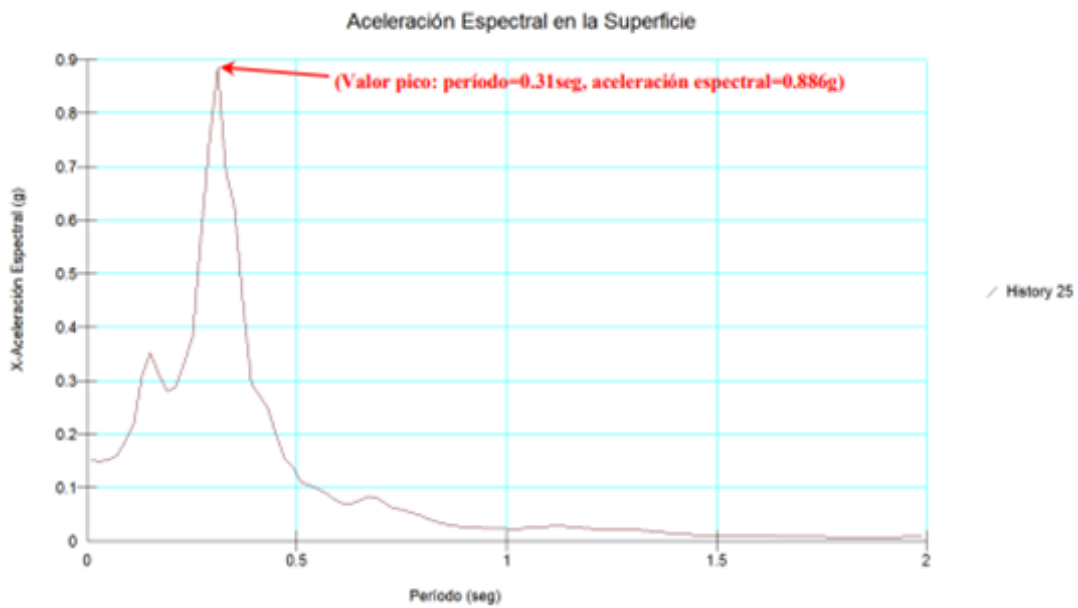
**Figura 64**

*Aceleración-tiempo historia en la superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa*



**Figura 65**

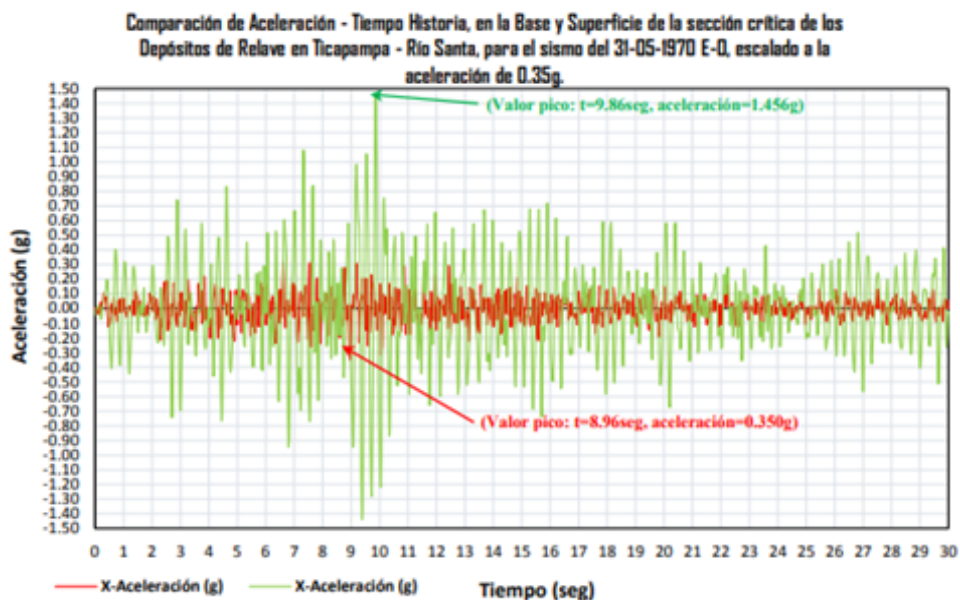
*Aceleración espectral en la superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa*



La Figura 66 muestra los resultados obtenidos de la comparación de la aceleración tiempo historia entre la base y la superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en abandono en Ticapampa.

**Figura 66**

*Comparación de aceleración tiempo historia, entre la base y la superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, para el sismo del 31-05-1970 E-O, escalado a la aceleración de 0.35g*



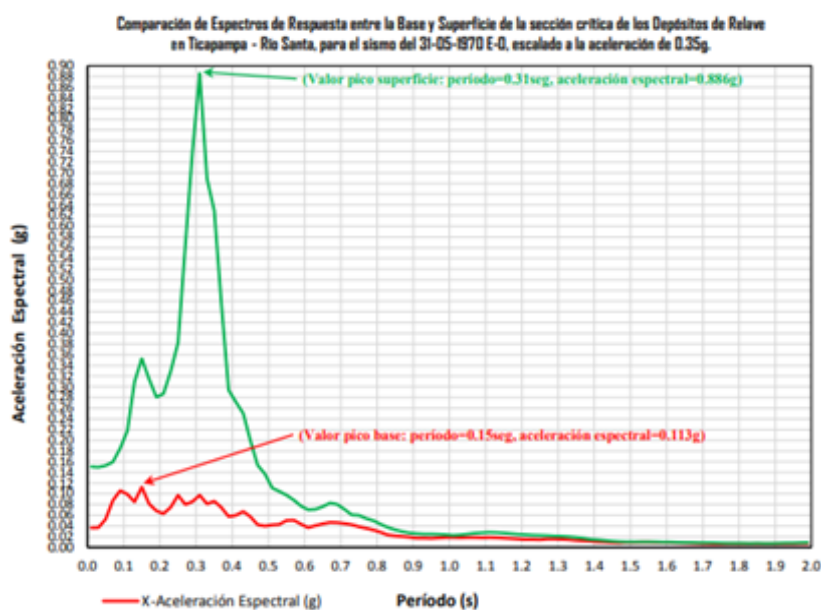
Mediante el análisis de los resultados de los espectros de respuesta entre la base y la superficie de los depósitos de relave abandonados en Ticapampa, se lleva a cabo una exhaustiva evaluación del comportamiento sísmico y geotécnico de estos materiales. Esta evaluación permite examinar cómo

se comportan durante y después de un sismo, así como observar el impacto del evento sísmico en su estabilidad.

En la Figura 67 se presentan los resultados de la comparación de los espectros de respuesta entre la base y la superficie de la sección crítica de los depósitos de relave abandonados en Ticapampa. Estos resultados son fundamentales para comprender el comportamiento sísmico de los materiales y obtener una visión clara de cómo se ven afectados por la acción sísmica.

### Figura 67

Comparación de espectros de respuesta, en la base y superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, para el sismo del 31-05-1970 E-O, escalado a la aceleración de 0.35g



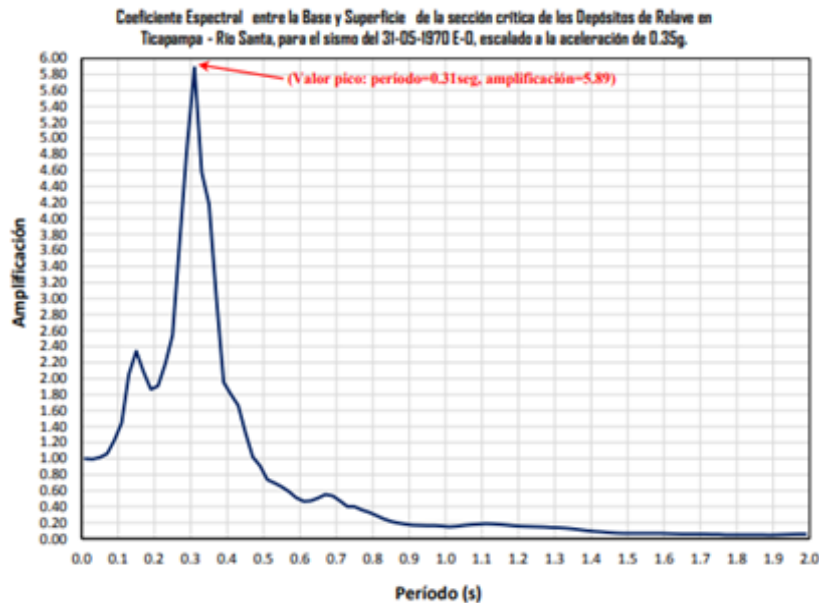
A partir de los resultados de los espectros de respuesta entre la base y la superficie de los depósitos de relave abandonados en Ticapampa, se obtiene un valor que representa el coeficiente espectral correspondiente a estos depósitos. Este coeficiente espectral se considera como un indicador de la acción sísmica que se experimenta entre la base y la superficie de los estratos de materiales, lo que permite analizar y evaluar la amplificación sísmica que ocurre en estos depósitos.

En la Figura 68 se muestra el resultado del coeficiente espectral obtenido entre la base y la superficie de la sección crítica de los depósitos de relave abandonados en Ticapampa, que ha sido ajustado a una aceleración de 0.35 g. Este resultado proporciona información valiosa para comprender la amplificación sísmica que se presenta en estos depósitos.



## Figura 68

Coeficiente espectral entre la base y superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, para el sismo del 31-05-1970 E-O, escalado a la aceleración de 0.35g



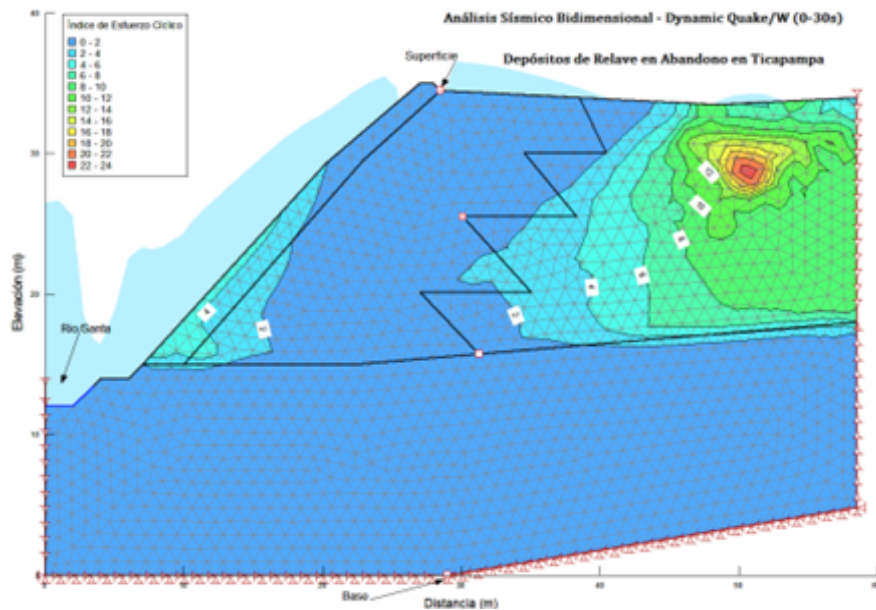
El software *Quake/W* 2007 ofrece la capacidad de analizar la posibilidad de licuación en los depósitos de relave abandonados. Este análisis se realiza mediante la determinación de la función de relación de presión de poro ( $ru$ ), así como la función de número cíclico y relación de corte cíclico (CSR), cuyos resultados se muestran en las Figuras 30, 31, 32, 33 y 34. Estos datos permiten obtener el CSR (Cyclic Stress Ratio - relación de esfuerzo cíclico) para los estratos de materiales presentes en los depósitos de relave.

En la Figura 69 se presentan los resultados obtenidos de la relación de esfuerzo cíclico CSR, correspondiente al análisis de licuación de suelos en la sección crítica de los depósitos de relave abandonados en Ticapampa.

Se colige que, a partir de la evaluación realizada sobre la posible licuación de suelos en los depósitos de relave, y tomando en cuenta los resultados obtenidos de CSR, se determina que no se producirá licuación en dichos depósitos. Esto se debe a la buena densificación de los materiales presentes en los relaves, tal como se muestra en la Figura 69 donde se analiza este fenómeno.

## Figura 69

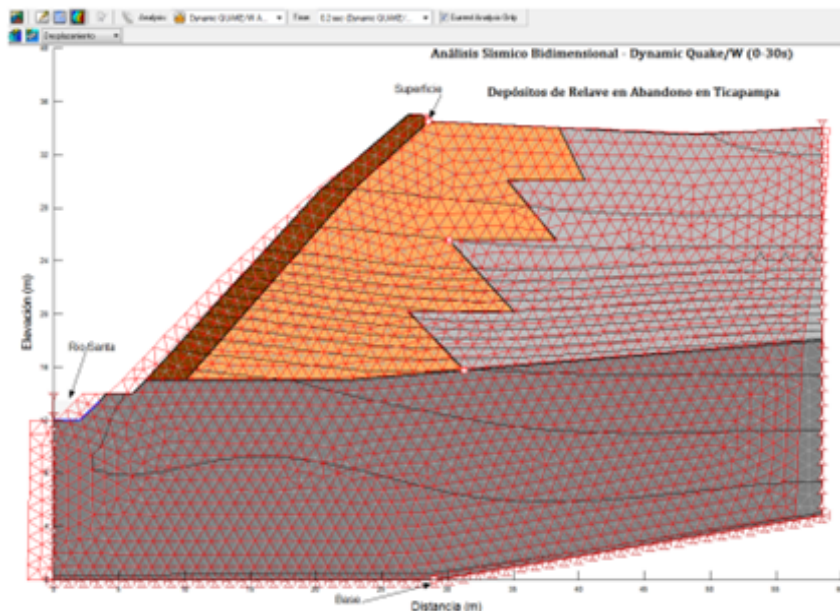
Resultados obtenidos de CSR (relación de esfuerzo cíclico) para análisis de licuación, en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa



En las Figuras 70, 71, 72 y 73, se muestran los resultados obtenidos de los movimientos del desplazamiento ocurrido en los depósitos de relave en Ticapampa.

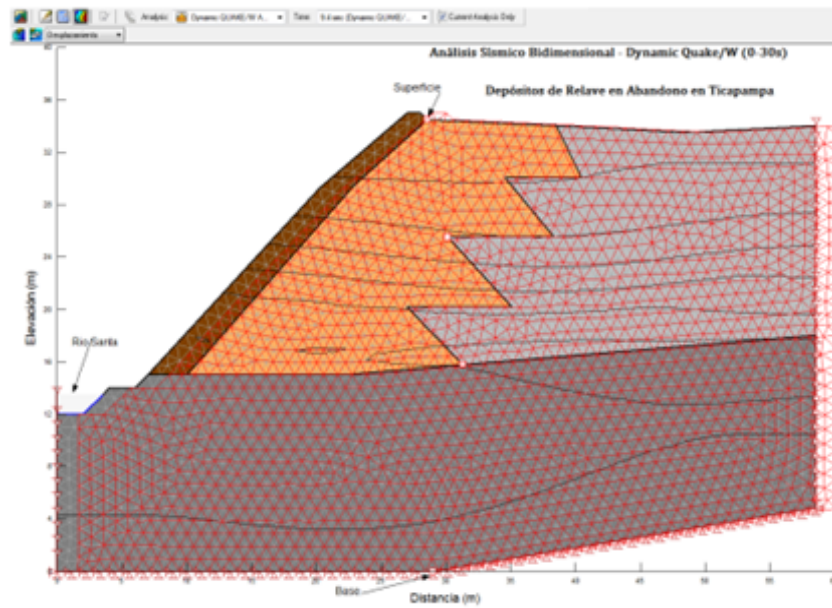
## Figura 70

Desplazamiento en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, para un tiempo de 0.2 s



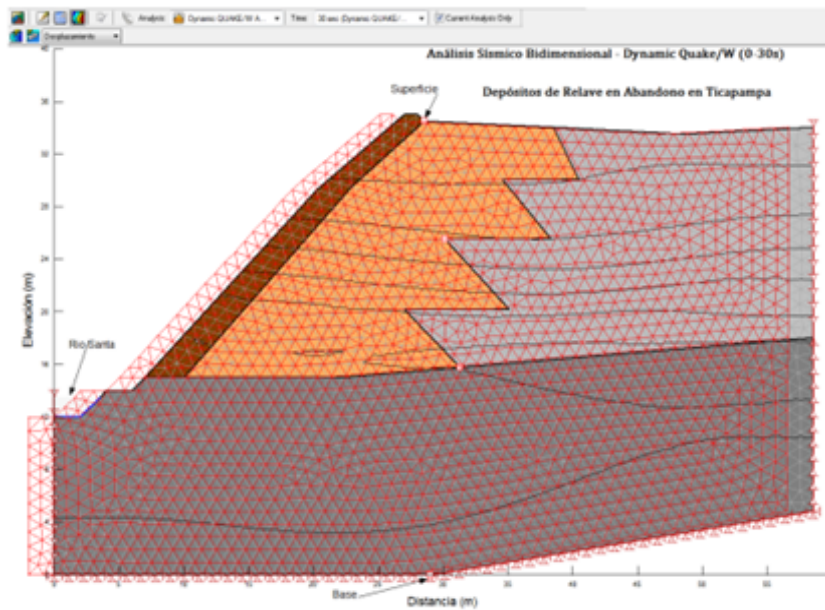
**Figura 71**

*Desplazamiento en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, para un tiempo de 9.4 s*



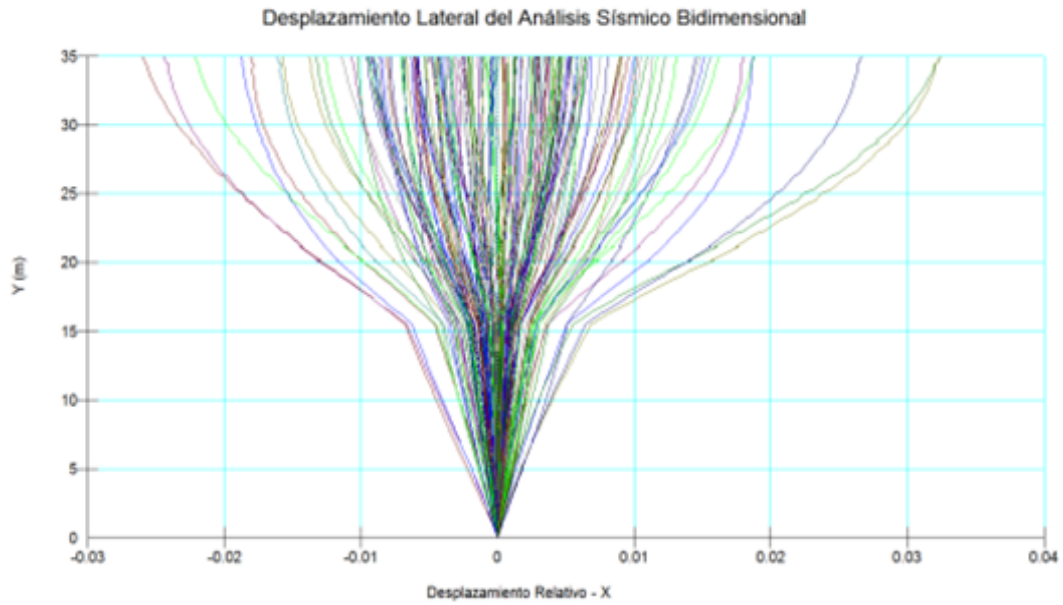
**Figura 72**

*Desplazamiento en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, para un tiempo de 30.0 s*



### Figura 73

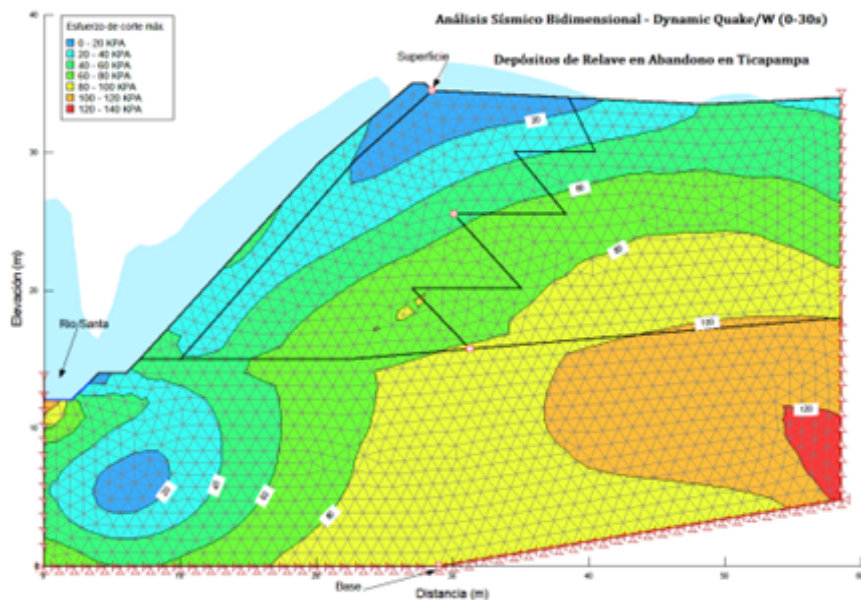
Desplazamientos laterales relativos a la base fija en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa



En la Figura 74 se muestran los resultados obtenidos del esfuerzo de corte máximo que se produce en los depósitos de relave en abandono en Ticapampa.

### Figura 74

Esfuerzo de corte máximo del análisis sísmico bidimensional en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa



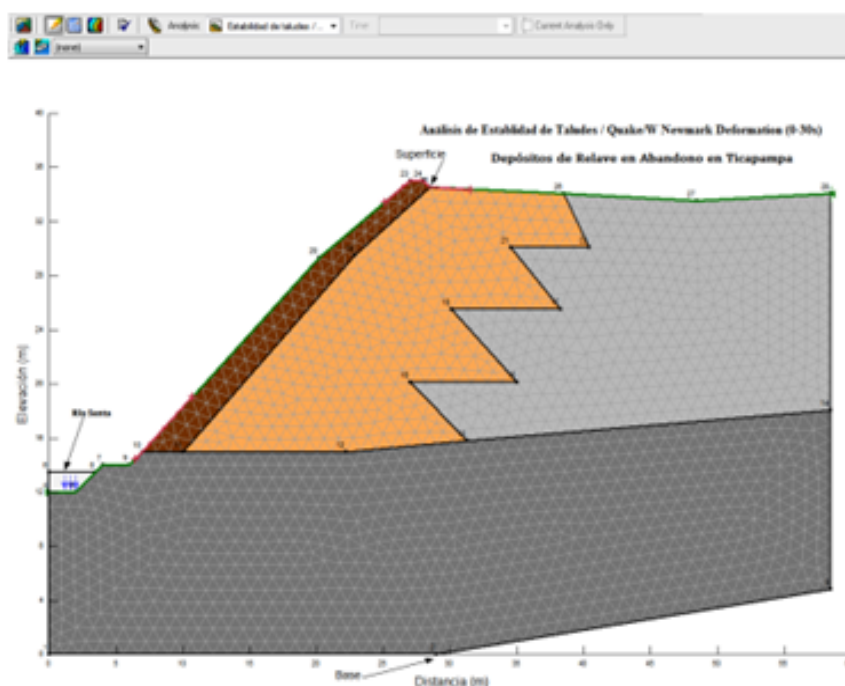
### Análisis de Estabilidad de Taludes con la Teoría de la Deformación Permanente de Newmark

El método utilizado por el software Quake/W para evaluar las deformaciones permanentes se fundamenta en los principios del análisis del bloque deslizante de Newmark. Este enfoque consiste en realizar un análisis de estabilidad en cada momento del sismo y calcular el factor de seguridad correspondiente para diversas superficies de falla. Cuando los factores de seguridad son inferiores a 1, implica que se produce un desplazamiento de la masa a lo largo de la superficie de falla, lo cual resulta en una pequeña deformación permanente en ese momento específico. La suma de todas estas pequeñas deformaciones permanentes generadas durante el sismo proporciona la máxima deformación permanente en la falla al finalizar el movimiento sísmico. Es importante destacar que la deformación calculada de esta manera se alinea paralelamente a la falla que la origina.

A continuación, se presentan las representaciones gráficas que muestran la variación del factor de seguridad para las superficies de falla consideradas críticas en la sección analizada bajo la influencia del sismo.

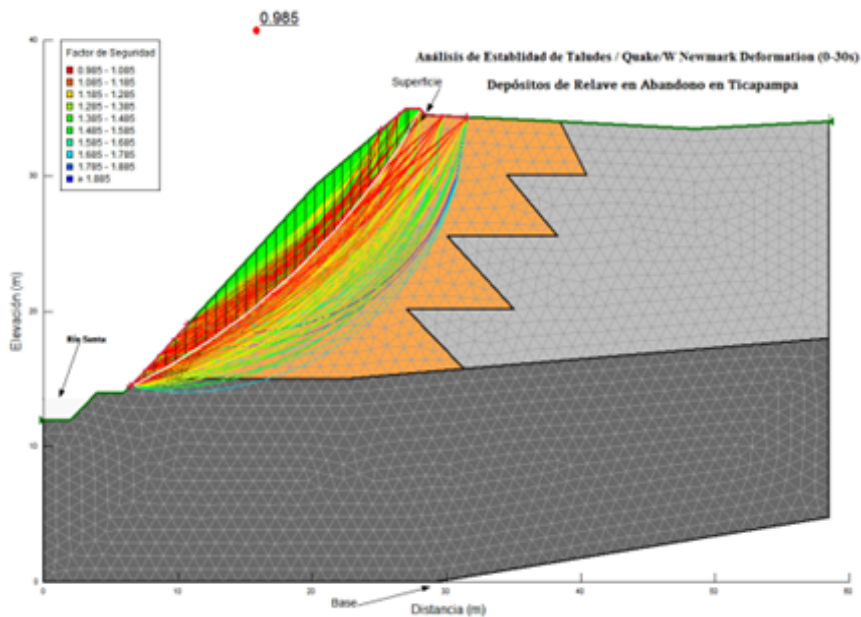
#### Figura 75

Análisis de estabilidad de taludes post-sismo en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, bajo el efecto del sismo del 31-05-1970 E-O, escalado a la aceleración de 0.35g



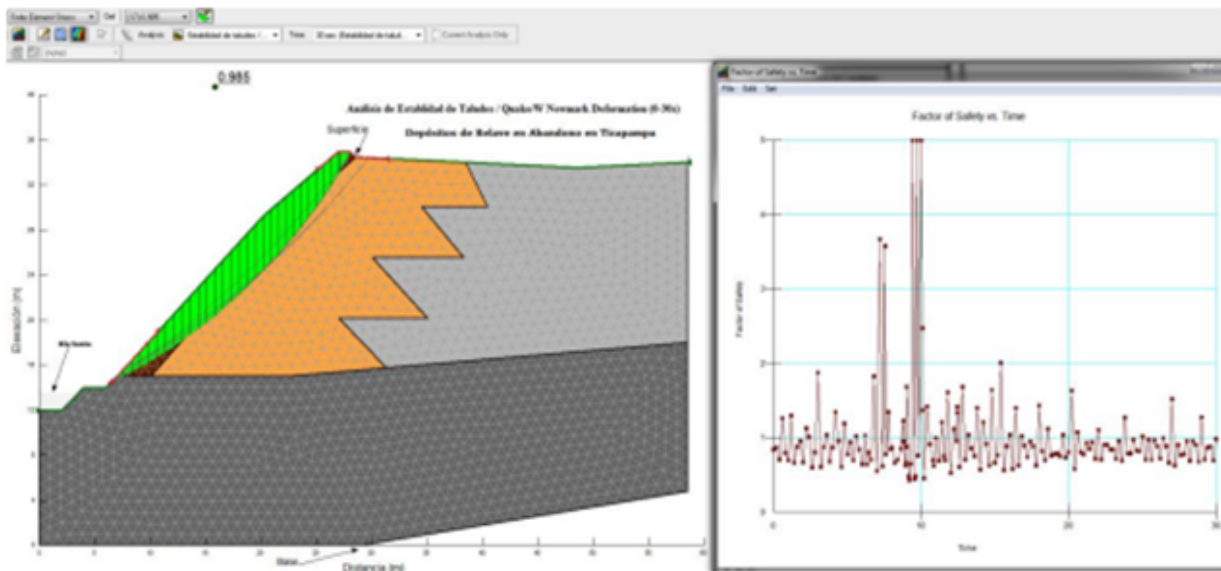
## Figura 76

$FS=0.985$  para el tiempo de 30.0seg, del análisis de estabilidad de taludes post-sismo en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, bajo el efecto del sismo del 31-05-1970 E-O, escalado a la aceleración de  $0.35g$



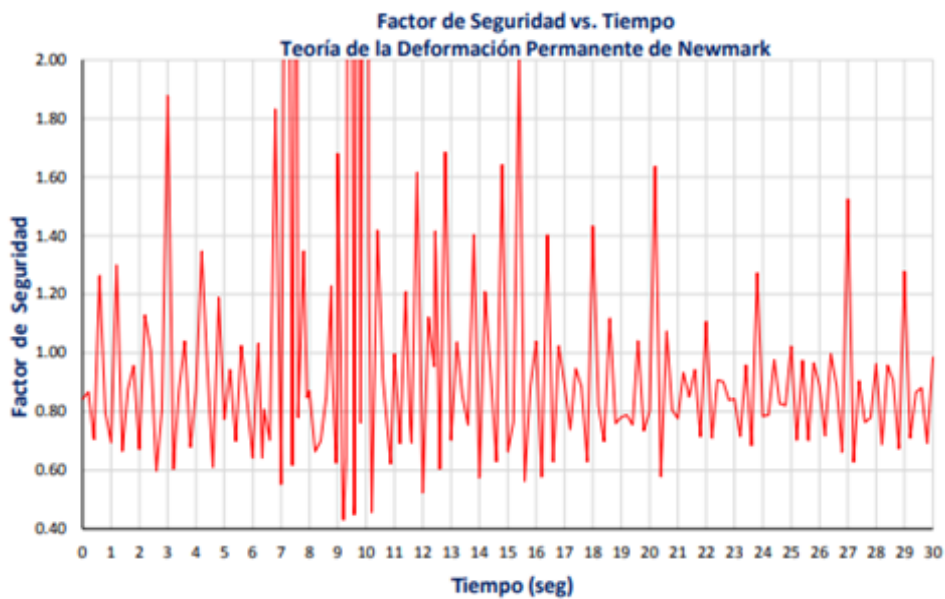
## Figura 77

Factor de seguridad vs. tiempo, del análisis de estabilidad de taludes post-sismo en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, bajo el efecto del Sismo del 31-05-1970 E-O, escalado a la aceleración de  $0.35g$



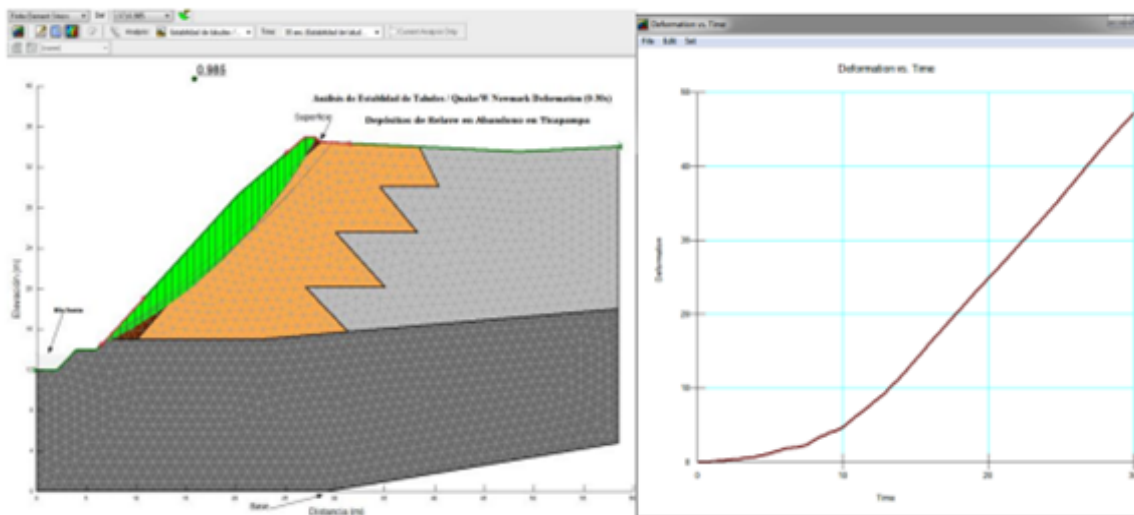
### Figura 78

Resultado de factor de seguridad vs. tiempo, del análisis de estabilidad de taludes post-sismo en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, bajo el efecto del Sismo del 31-05-1970 E-O, escalado a la aceleración de 0.35 g



### Figura 79

Deformación vs. tiempo (deformación permanente en cm, estimado por la teoría de Newmark), del análisis de estabilidad de taludes post-sismo en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, bajo el efecto del sismo del 31-05-1970 E-O, escalado a la aceleración de 0.35g



## Figura 80

Resultado de deformación vs. tiempo (deformación permanente en cm, estimado por la teoría de Newmark), del análisis de estabilidad de taludes post-sismo en la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa, bajo el efecto del Sismo del 31-05-1970 E-O, escalado a la aceleración de 0.35g



Se presentan, a continuación, un resumen, comentarios y conclusiones basados en los resultados obtenidos para la condición actual:

- Existen diferencias significativas en los valores de presión de poros de agua entre el análisis estático inicial y el análisis dinámico, lo que implica cambios en el nivel de la napa freática considerada en el modelo geométrico. La presión de poros igual a cero aumenta hacia la superficie de los depósitos de relave en abandono. Asimismo, los esfuerzos efectivos disminuyen debido a la acción del sismo. En el caso de la presión de poros del agua, se observan incrementos significativos debido al sismo, y la presión de poros del agua muestra modificaciones considerables en el análisis dinámico, con la aparición de la napa freática casi en la superficie en algunos tramos del depósito de relave. En cuanto al esfuerzo efectivo, se observa principalmente una presión nula en la base del talud del depósito de relave en el análisis dinámico, y las presiones son variables y disminuyen en comparación con las presiones más homogéneas del análisis estático inicial. Estas modificaciones en las gráficas de presiones se deben al movimiento generado por el sismo, lo que resulta en mayores deformaciones en la estructura geotécnica.
- En el análisis de desplazamiento tiempo historia entre la base y la superficie de los depósitos de relave, se observa un aumento del desplazamiento pico horizontal de 0.477 m en la base a 0.515 m en la superficie.
- En el análisis de desplazamiento espectral entre la base y la superficie de los depósitos de relave, se observa un aumento del desplazamiento espectral pico de 0.0127 m a 0.0224 m.



- En el análisis de velocidad tiempo historia entre la base y la superficie de los depósitos de relave, se observa un aumento de la velocidad pico horizontal de 0.1689 m/s en la base a 0.6638 m/s en la superficie.
- En el análisis de velocidad espectral entre la base y la superficie de los depósitos de relave, se observa un aumento de la velocidad espectral pico de 0.0346 m/s a 0.2690 m/s.
- En el análisis de aceleración tiempo historia entre la base y la superficie de los depósitos de relave, se observa un aumento de la aceleración pico horizontal de 0.350 g en la base a 1.456 g en la superficie.
- En el análisis de aceleración espectral entre la base y la superficie de los depósitos de relave, se observa un aumento de la aceleración espectral pico de 0.1130 g en la base a 0.886 g en la superficie.
- Comparando los espectros de respuesta entre la base y la superficie de los depósitos de relave, se obtiene una amplificación de 5.89 en el coeficiente espectral.
- El análisis de licuación de suelos indica que no se producirá licuación en los depósitos de relave, ya que se obtienen valores de la Relación de Esfuerzo Cíclico (CSR) de hasta el 24 %, debido a la buena densificación de los materiales de los relaves.
- El esfuerzo de corte máximo del depósito de relave es de 120 kPa, presentándose en el interior de los depósitos, mientras que superficialmente se observan valores de 20 a 40 kPa.
- En el análisis de estabilidad de taludes post sismo utilizando el método de la deformación permanente de Newmark, se obtiene un factor de seguridad de 0.985 y una deformación permanente máxima de 47.12 cm.
- Comparando los resultados del análisis dinámico, donde se obtiene un desplazamiento pico horizontal de 0.515 m, con el método de la deformación permanente de Newmark, que arroja 47.12 cm (0.471 m), se concluye que los desplazamientos máximos en los depósitos de relave para la condición actual son similares. Por lo tanto, la evaluación del comportamiento sísmico de los depósitos de relave se llevará a cabo utilizando los valores máximos obtenidos en el análisis dinámico con el programa de elementos finitos Quake/W.

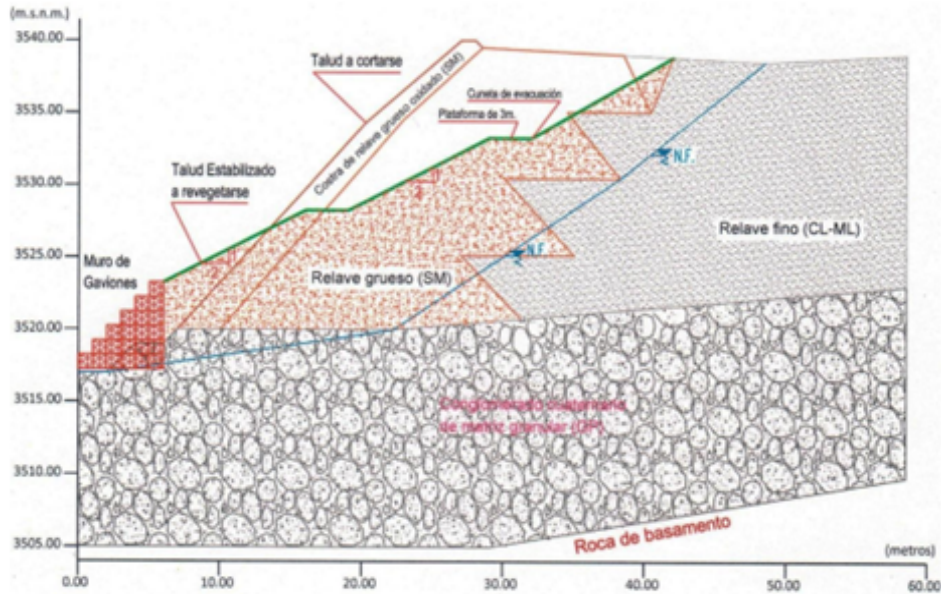
*Análisis bidimensional del comportamiento sísmico geotécnico en condición estabilizada de los depósitos de relave en abandono de Ticapampa*

Se llevó a cabo el análisis correspondiente a la propuesta presentada en la Figura 81 y en el plano P-2 (Perfil Longitudinal - Sección Crítica Estabilizada). En la condición estabilizada, se muestra la sección transversal del talud actual y las modificaciones necesarias para lograr un talud estabilizado que permita la revegetación. Se propone una estructura de contención con un muro de gaviones, un talud de 2:1, una plataforma de 3 metros con una pendiente del 2 % hacia cunetas de evacuación. Además, se deberá diseñar un tratamiento adecuado para garantizar la estabilidad geoquímica, la estabilidad hidrológica y otros aspectos contemplados en las directrices de la ley y reglamento de cierre de pasivos ambientales mineros y las normas ambientales. En la Figura 82, se muestra el modelo geométrico desarrollado en el

software *Quake/W* 2007 para representar la condición estabilizada propuesta en nuestra investigación para la sección crítica de los depósitos de relave en abandono en Ticapampa.

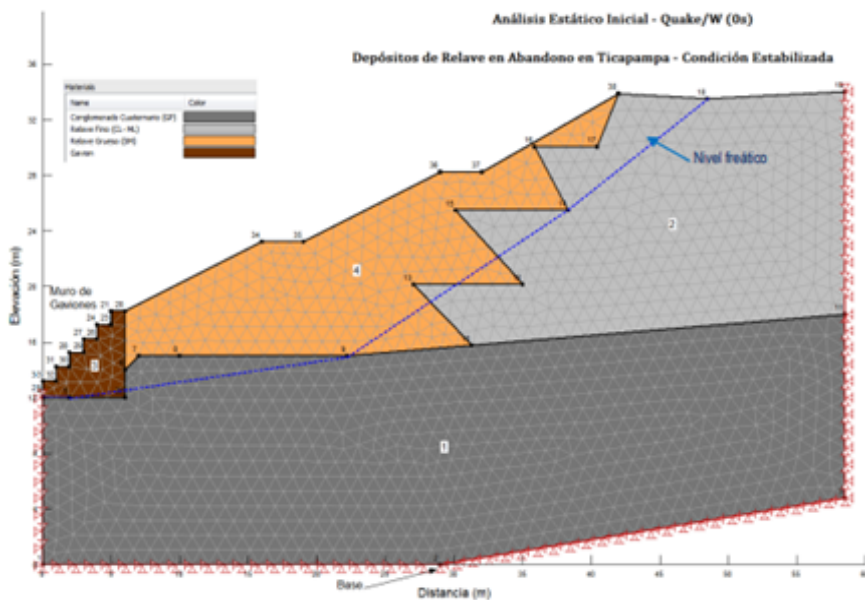
**Figura 81**

*Sección crítica estabilizada de los depósitos de relave en Ticapampa*



**Figura 82**

*Modelamiento geométrico en el Quake/W 2007, en condición estabilizada en la sección crítica para los depósitos de relave en Ticapampa*

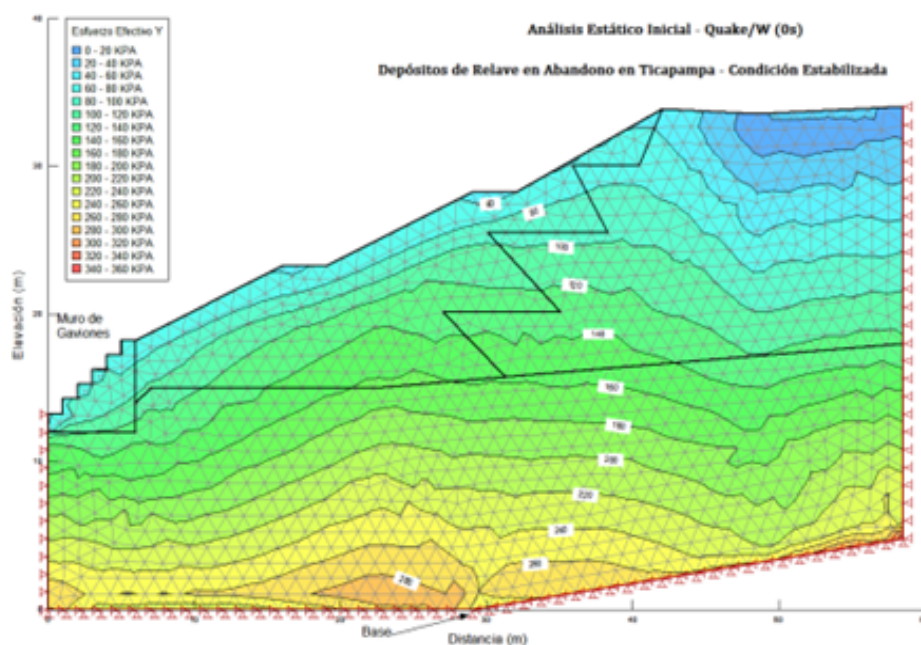


De forma análoga al procedimiento llevado a cabo para la condición actual, se procedió a realizar el análisis estático inicial utilizando el *software* *Quake/W* 2007, obteniendo así los resultados correspondientes a la condición estabilizada. En la Figura 83 se presentan los resultados obtenidos para

los esfuerzos efectivos del análisis estático inicial en la condición estabilizada de la sección crítica de los depósitos de relave en abandono en Ticapampa.

### Figura 83

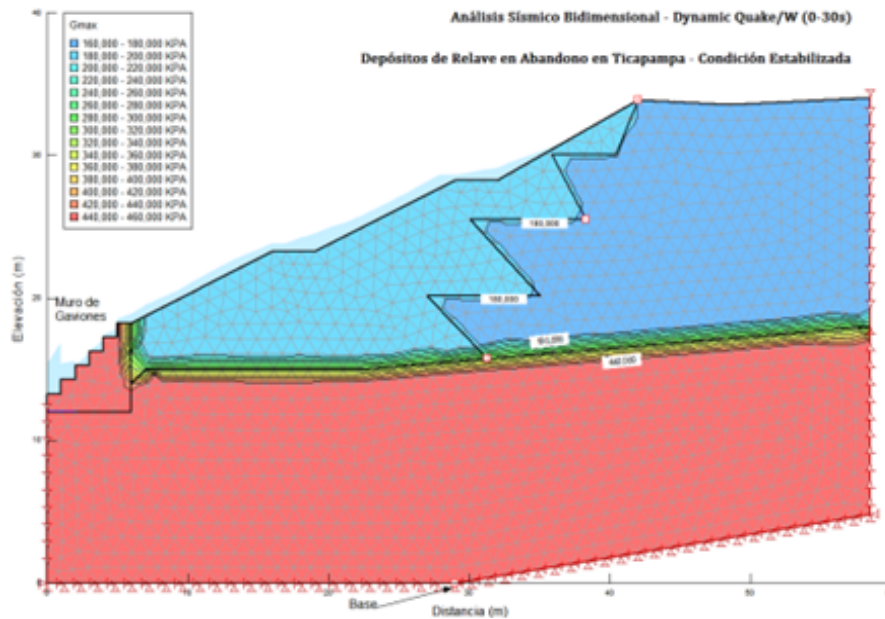
*Esfuerzos efectivos del análisis estático inicial en la condición estabilizada de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa*



Una vez que se obtuvieron los resultados del análisis estático inicial, se procedió a realizar el análisis dinámico utilizando el terremoto del 31-05-1970 E-O con una duración de 30 segundos, aplicando el registro de aceleraciones sísmicas que se muestra en la Figura 42, el cual fue escalado a una aceleración de 0.33g. De esta manera, se generaron distribuciones de esfuerzos en la estructura para cada intervalo de tiempo del registro aplicado, obteniendo así los resultados del análisis dinámico sísmico. Las Figuras 84, 85, 86, 87, 88 y 89 presentan los resultados de las propiedades dinámicas (G<sub>máx</sub> y Gequivalente), esfuerzos efectivos, desplazamientos, velocidades y aceleraciones obtenidos a partir del análisis dinámico sísmico utilizando el *software* Quake/W 2007.

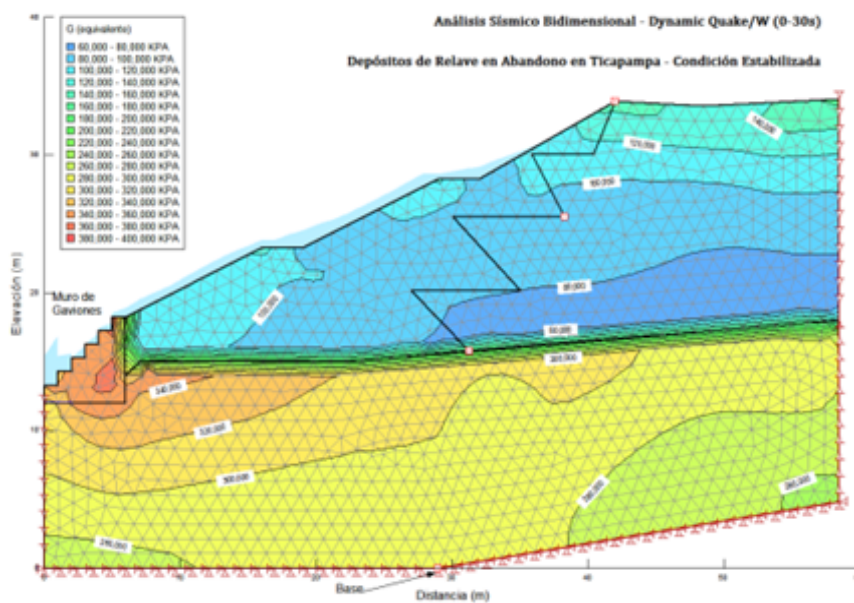
**Figura 84**

Propiedades dinámicas- $G_{máx}$ , del análisis dinámico en la condición estabilizada de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa



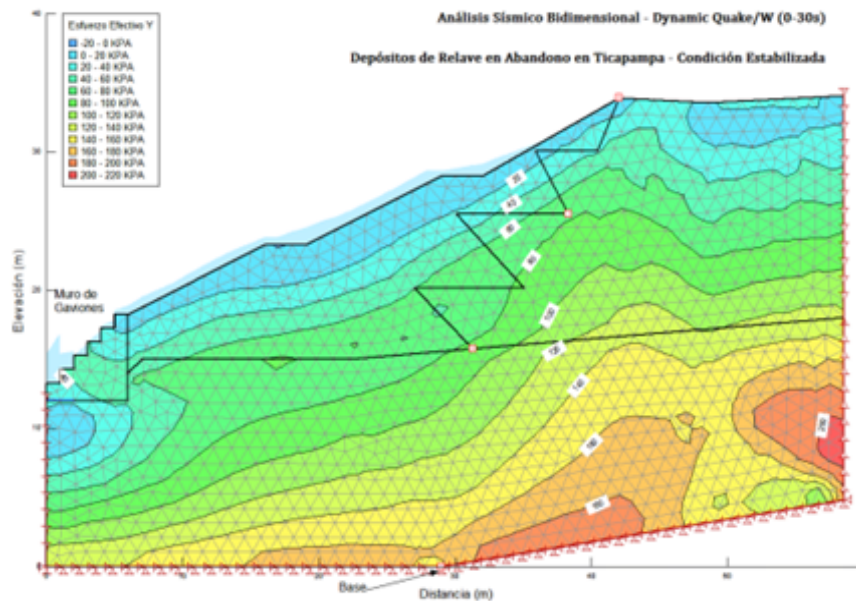
**Figura 85**

Propiedades Dinámicas-G (equivalente), de análisis dinámico en la condición estabilizada de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa



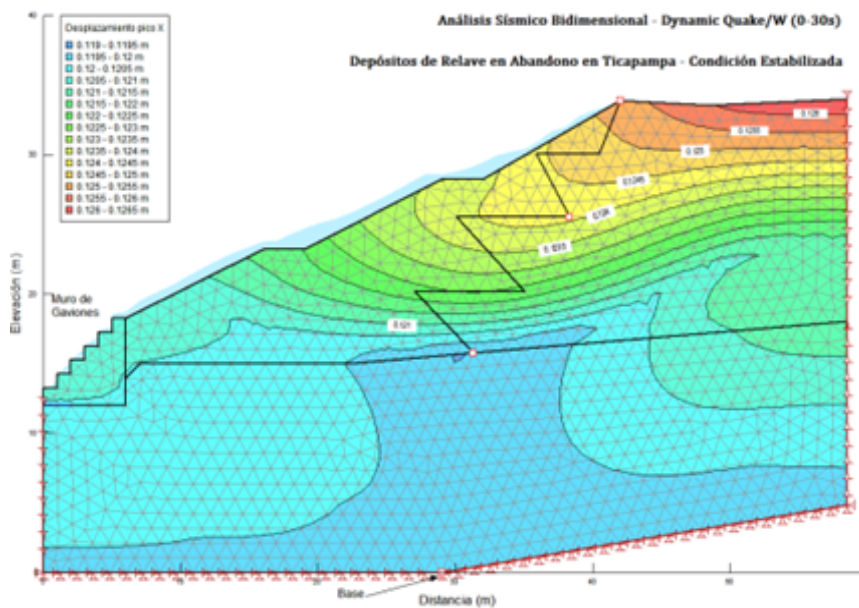
**Figura 86**

*Esfuerzos efectivos del análisis dinámico en la condición estabilizada de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa*



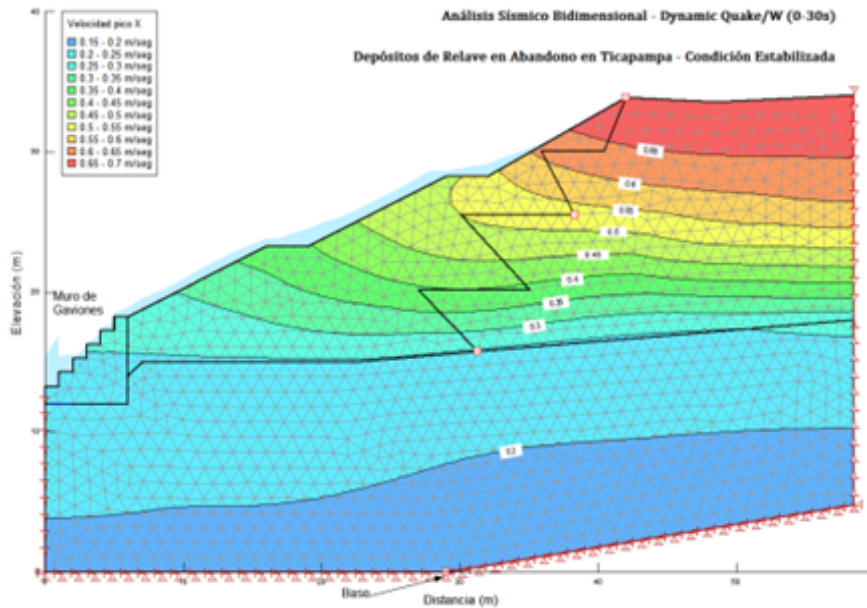
**Figura 87**

*Desplazamientos obtenidos del análisis dinámico en la condición estabilizada de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa*



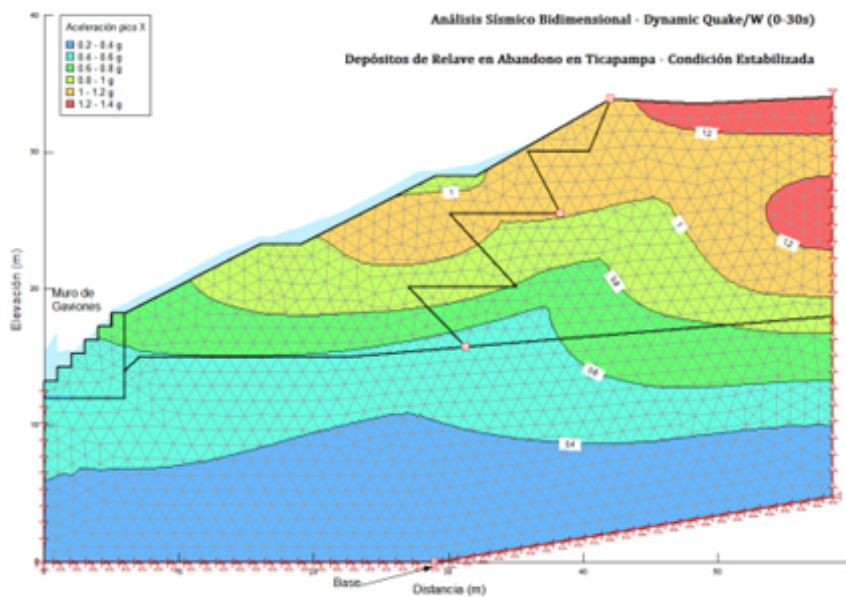
### Figura 88

Velocidades obtenidas del análisis dinámico en la condición estabilizada de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa



### Figura 89

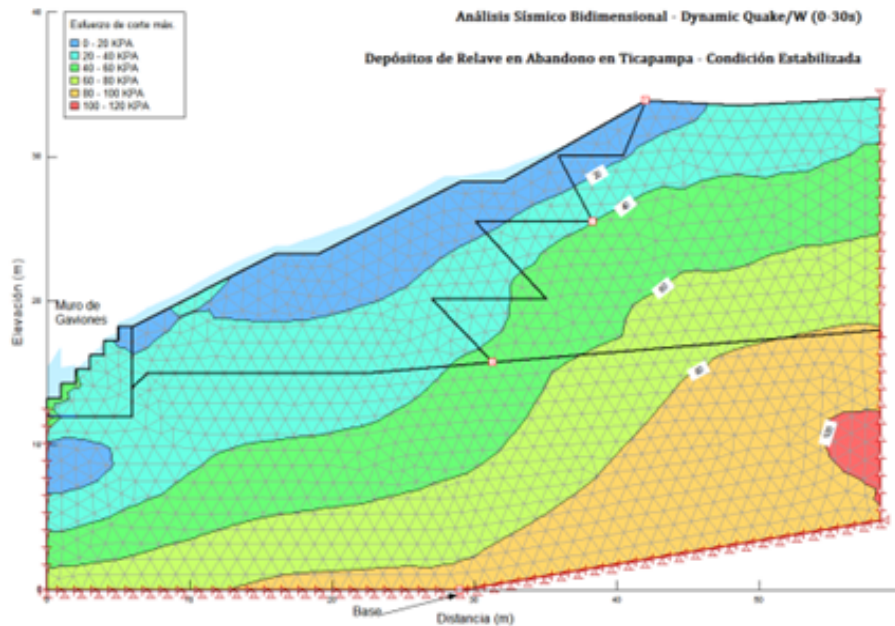
Aceleraciones obtenidas del análisis dinámico en la condición estabilizada de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa



La Figura 90 presenta los resultados obtenidos del análisis dinámico sísmico para el máximo esfuerzo cortante en la condición estabilizada de los depósitos de relave abandonados en Ticapampa.

## Figura 90

*Esfuerzo de corte máximo del análisis dinámico en la condición estabilizada de la sección crítica de los depósitos de relave en Ticapampa*

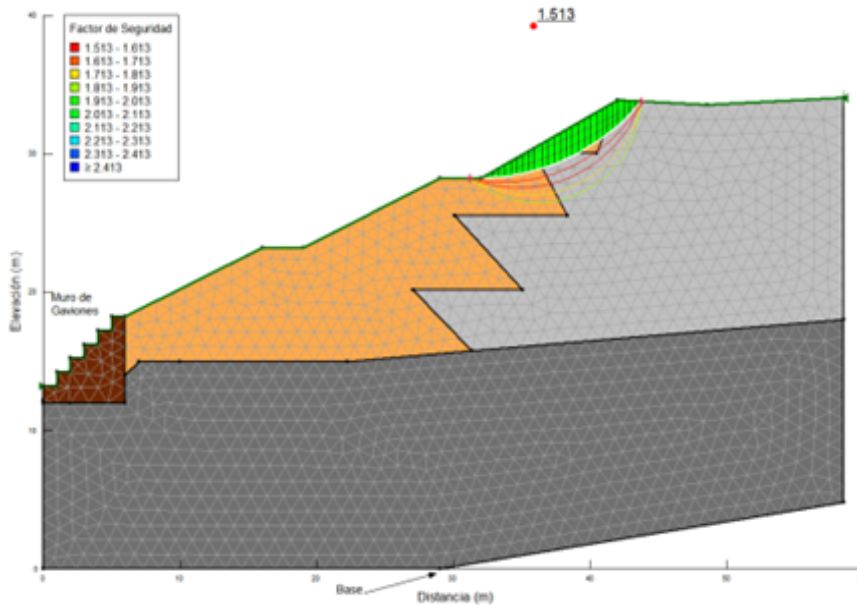


A partir de los resultados obtenidos en el análisis dinámico sísmico, se tendrá la capacidad de llevar a cabo una evaluación bidimensional adecuada del comportamiento sísmico geotécnico de estabilidad de los depósitos de relave, así como realizar una comparación entre la condición actual y la condición estabilizada que se ha analizado.

Por último, para la condición estabilizada propuesta en la sección crítica de los depósitos de relave abandonados en Ticapampa, se llevó a cabo el análisis de estabilidad de taludes utilizando la teoría de deformación permanente de Newmark del programa Quake/W 2007. Los resultados de este análisis, incluyendo el factor de seguridad y la deformación permanente, se presentan en las Figuras 91 y 92.

### Figura 91

*FS=1.513 para el tiempo de 30.0 s, del análisis de estabilidad de taludes post-sismo en la condición estabilizada en los depósitos de relave en Ticapampa*



### Figura 92

*Resultado de deformación vs. tiempo (deformación permanente en cm, estimado por la teoría de Newmark), del análisis de estabilidad de taludes post-sismo en la condición estabilizada en los depósitos de relave en Ticapampa*



Resumen de información, observaciones y conclusiones derivadas de los resultados obtenidos para la situación estabilizada:

- Con respecto al análisis de desplazamiento máximo horizontal entre la base y la superficie de los depósitos de relave, se registra un aumento de 0.119 m a 0.128 m.



- En relación con el análisis de velocidad pico horizontal entre la base y la superficie de los depósitos de relave, se observa un incremento de 0.15 m/s a 0.65 m/s.
- Según el análisis de aceleración pico horizontal entre la base y la superficie de los depósitos de relave, se evidencia un aumento de 0.35 g a 1.20 g.
- El esfuerzo de corte máximo en el depósito de relave alcanza los 120 kPa, localizado en su interior.
- Al evaluar la estabilidad de los taludes después del sismo, se obtiene un factor de seguridad de 1.513, junto con una deformación permanente máxima de 11.83 cm.
- Comparando los resultados del análisis dinámico, donde el desplazamiento pico horizontal es de 0.128 m (equivalente a 12.8 cm), y el enfoque basado en la deformación permanente de Newmark que arroja 11.83 cm (0.118 m), se concluye que los desplazamientos máximos observados en los depósitos de relave en la condición estabilizada son similares. Por tanto, para nuestra evaluación del comportamiento sísmico de los depósitos de relave, se utilizarán los valores máximos obtenidos en el análisis dinámico realizado con el programa de elementos finitos Quake/W.

Basándose en los hallazgos del estudio, se procede ahora a examinar en detalle el desempeño sísmico geotécnico de los depósitos de relave en abandono en Ticapampa a través de una evaluación bidimensional. Además, se lleva a cabo una discusión exhaustiva de los resultados obtenidos en dicho análisis.

### **Discusión de resultados**

La evaluación bidimensional realizada en los depósitos de relave en abandono en Ticapamparío Santa (condición actual) revela que al analizarlos con el registro tiempo-historia del sismo ocurrido en Ancash el 31-05-1970 E-O, escalado a una aceleración de 0.35 g, se observan desplazamientos, velocidades, aceleraciones y deformaciones significativas, lo que indica la generación de fallas en los depósitos de relave en abandono. Mediante el análisis dinámico sísmico utilizando el programa de elementos finitos Quake/W, se ha obtenido un desplazamiento máximo de 0.515 m (51.5 cm) en la superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en la condición actual.

Como alternativa de solución propuesta en nuestra investigación, se plantea la estabilidad física de los depósitos de relave en abandono. Las Figuras 81 y 82 muestran la condición estabilizada para los depósitos, la cual también ha sido analizada utilizando el mismo registro tiempo-historia del sismo ocurrido en Ancash el 31-05-1970 E-O, escalado a una aceleración de 0.35 g. A través del análisis dinámico sísmico con el programa de elementos finitos Quake/W, se ha obtenido un desplazamiento máximo de 0.128 m (12.8 cm) en la superficie de la sección crítica de los depósitos de relave en la condición estabilizada.

El escalamiento del sismo a una aceleración de 0.35 g se realiza porque en un análisis dinámico sísmico es necesario evaluar con un valor máximo o extremo de diseño. Basándose en la sismicidad del área de estudio y los datos de la Tabla 1 que resumen las condiciones de la evaluación del peligro sísmico en la zona, se concluye que para la investigación se ha considerado una aceleración sísmica máxima de diseño de 0.35 g, y es a este valor al que se ha escalado la aceleración tiempo-historia del sismo del 31-05-1970 E-O, mostrada en la Figura 42.

A continuación, se analizan y discuten los resultados para el comportamiento sísmico-geotécnico en el análisis de los depósitos de relave tanto en la condición actual como en la condición estabilizada:

- El comportamiento sísmico geotécnico se determina mediante la aplicación adecuada de la metodología analítica descrita en la Figura 36. Para esto, se ha utilizado el modelamiento geométrico (Figura 37) del *software* Quake/W 2007 en la sección crítica (Perfil 1-1) de los depósitos de relave en abandono en Ticapampa. En este modelamiento, se han considerado los parámetros geotécnicos y dinámicos (Figura 38) obtenidos a partir de los trabajos de caracterización de campo y laboratorio, los cuales son fundamentales para este estudio.
- A partir de los resultados del análisis estático inicial (Figuras 39, 40 y 41) y del análisis dinámico (Figuras 48, 49 y 50), se observan cambios en los esfuerzos efectivos y la presión de poros. En el análisis dinámico, la presión de poros aumenta desde cero hasta la superficie de los depósitos de relave en abandono, mientras que los esfuerzos efectivos disminuyen debido al efecto del sismo. Estos cambios son esenciales para evaluar el comportamiento post sísmico de los depósitos de relave.
- Se ha realizado un análisis estático inicial similar para la condición estabilizada del modelo geométrico propuesto, el cual se muestra en la Figura 83 (esfuerzo efectivo). Luego, se aplicó el análisis dinámico para obtener los resultados de las propiedades dinámicas (Figuras 84 y 85), que se modifican debido a la convergencia del programa Quake/W 2007 para el sismo analizado. En la Figura 86 se presentan los esfuerzos efectivos obtenidos en el análisis dinámico, revelando el cambio de comportamiento experimentado por los depósitos de relave.
- Las propiedades dinámicas se han modificado de  $G_{m\acute{a}x}$  a  $G_{equivalente}$  y relación de amortiguamiento (Figuras 44, 45 y 46) debido a la convergencia del programa Quake/W 2007 para el sismo analizado, lo que ha permitido obtener parámetros más adecuados para el análisis dinámico.
- En la Figura 51 se muestran los resultados de los desplazamientos obtenidos del análisis dinámico en la condición actual. Los desplazamientos tiempo historia y desplazamiento espectral entre la base y la superficie de los depósitos de relaves se presentan en las Figuras 52, 53, 54 y 55. Del análisis se obtiene un desplazamiento máximo en la superficie de 0.515 m (51.5 cm) en un tiempo de 7.60 s. Este desplazamiento implica un alto riesgo de deslizamiento de los depósitos de relave en caso de un sismo severo.
- La Figura 87 muestra los resultados de los desplazamientos obtenidos del análisis dinámico para la condición estabilizada de los depósitos de relave en Ticapampa. Se observa que el mayor desplazamiento ocurre en la superficie de los depósitos, con una magnitud de 0.128 m (12.8 cm). En comparación, el desplazamiento pico horizontal en la superficie disminuye de 0.515 m a 0.128 m, lo que representa una disminución de 0.387 m (38.7 cm). Esta reducción en el desplazamiento entre la condición actual y la condición estabilizada se debe a la implementación de un talud estabilizado de pendiente 2:1 y una plataforma de 3 m en el modelo geométrico propuesto.
- Los resultados de las velocidades obtenidos del análisis dinámico para la condición actual se presentan en la Figura 56. Las velocidades tiempo historia y velocidades espectrales entre la

base y la superficie de los depósitos de relave se muestran en las Figuras 57, 58, 59 y 60, donde se obtiene una velocidad máxima de 0.6698 m/s en la superficie.

- Para la condición estabilizada, los resultados de las velocidades obtenidos del análisis dinámico se muestran en la Figura 88, revelando que la mayor velocidad se produce en la superficie de los taludes de los depósitos de relave, con un valor de 0.65 m/s. Las velocidades pico en la condición actual y la condición estabilizada difieren solo en 0.0198 m/s, lo que indica una similitud casi exacta. Esto se debe a la aplicación del mismo sismo al modelo analizado y a la compatibilidad y similitud en el comportamiento de estos materiales.
- Los resultados de las aceleraciones obtenidos del análisis dinámico para la condición actual se muestran en la Figura 61. Las aceleraciones tiempo historia y aceleraciones espectrales entre la base y la superficie de los depósitos de relave se presentan en las Figuras 62, 63, 64 y 65, obteniéndose una aceleración máxima de 1.456 g en la superficie.
- Para la condición estabilizada, los resultados de las aceleraciones obtenidos del análisis dinámico se muestran en la Figura 89, indicando que la mayor aceleración se produce en la superficie de los taludes de los depósitos de relave, con un valor de 1.2 g. Comparando los resultados entre la condición estabilizada y la condición actual, se observa un aumento de 0.246 g en la aceleración.
- La Figura 66 muestra la comparación de la aceleración tiempo historia entre la base y la superficie de los depósitos de relave en la condición actual. Se obtiene que la aceleración de 0.35 g en la base aumenta a 1.456 g en la superficie, lo que indica una amplificación sísmica significativa. En la Figura 67, se aprecia que la aceleración espectral aumenta de 0.113 g en la base a 0.886 g en la superficie.
- En la Figura 68 se presenta el coeficiente espectral para la sección crítica analizada en los depósitos de relave en abandono en Ticapampa, resultando en una amplificación sísmica de 5.89 para la condición actual.
- Se ha evaluado la posibilidad de licuación de suelos en los depósitos de relave. El análisis de la Figura 69 muestra que, según los resultados obtenidos de la Relación de Esfuerzo Cíclico (CSR), no se producirá licuación de suelos en los depósitos de relave. Esto se debe a que los relaves están bien densificados debido al tiempo que han estado depositados en el área de estudio.
- Las Figuras 70, 71 y 72 muestran los movimientos de desplazamiento que ocurren en los depósitos de relave en la condición actual para diferentes tiempos (0.2 s, 9.4 s y 30.0 s, respectivamente). Estas figuras ilustran la deformación significativa que experimentan los depósitos de relave debido a la carga sísmica aplicada. En la Figura 73, se presentan los desplazamientos laterales relativos entre la base fija y la superficie de los depósitos, evidenciando que los desplazamientos son mayores a partir de los 15 m, donde se encuentra material de relave fino y grueso. Los mayores desplazamientos se producen a los 35 m, en la superficie del perfil del modelo geométrico analizado.
- La Figura 74 muestra el esfuerzo de corte máximo que ocurre en los depósitos de relave en la condición actual. Se observa un esfuerzo de 120 kPa en el interior de los depósitos, mientras que en la superficie se presentan valores de 20 a 40 kPa. En el caso de la condición estabilizada

(Figura 90), el esfuerzo de corte máximo muestra un comportamiento y valores similares a la condición actual, pero debido a una mayor estabilidad, el esfuerzo de corte disminuye hacia la parte inclinada de los depósitos de relave.


- Una vez realizado el análisis dinámico sísmico tanto para la condición actual como para la condición estabilizada de los depósitos de relave de Ticapampa, se utiliza la Teoría de Deformación Permanente de Newmark solo para obtener las condiciones posteriores al sismo y comparar los parámetros de factor de seguridad y deformación permanente en ambas condiciones.
- Del análisis de estabilidad de taludes para la condición actual mediante la Teoría de Deformación Permanente de Newmark (Figuras 75, 76, 77 y 78), se obtiene un Factor de Seguridad de 0.985 para el tiempo de 30 s del sismo. Estos resultados indican la inestabilidad de los depósitos de relave analizados en la condición actual. En las Figuras 79 y 80, se muestra la deformación versus el tiempo (deformación permanente en cm, estimada por la Teoría de Newmark) obtenida del análisis de estabilidad de taludes después del sismo, resultando en una deformación de 47.12 cm.
- Al comparar los resultados para la condición actual obtenidos del análisis dinámico, donde el desplazamiento pico horizontal es de 0.515 m (51.5 cm), con el método de deformación permanente de Newmark que resulta en 47.12 cm (0.471 m), se concluye que los desplazamientos máximos en los depósitos de relave para la condición actual son similares. Para la evaluación del comportamiento sísmico de los depósitos de relave, se han considerado los valores máximos obtenidos en el análisis dinámico realizado con el programa de elementos finitos Quake/W.
- Del análisis de estabilidad de taludes para la condición estabilizada mediante la Teoría de Deformación Permanente de Newmark (Figura 91), se obtiene un Factor de Seguridad de 1.513 para el tiempo de 30 s del sismo. Este resultado indica la estabilidad adecuada de los depósitos de relave analizados en la condición estabilizada.
- En la Figura 92 se muestra la gráfica de la deformación versus el tiempo (deformación permanente en cm, estimada por la Teoría de Newmark) obtenida del análisis de estabilidad de taludes después del sismo, resultando en una deformación de 11.83 cm (0.1183 m). Esto, en comparación con el análisis realizado en la condición actual que resulta en 47.12 cm (0.471 m), muestra una gran disminución de la deformación permanente máxima, logrando una estabilidad física adecuada en el análisis realizado para la propuesta del modelo geométrico en la condición estabilizada. Además, esto es compatible con los resultados obtenidos del análisis dinámico sísmico realizado con el programa de elementos finitos Quake/W, donde el desplazamiento máximo o pico horizontal disminuye de 51.5 cm a 12.8 cm.
- De la discusión de los resultados para la condición actual de los depósitos de relave en abandono en Ticapampa, se concluye que estos depósitos son inestables y presentarán fallas de gran magnitud según el análisis dinámico sísmico realizado.
- De la discusión de los resultados para la condición estabilizada de los depósitos de relave en abandono en Ticapampa, se concluye que la propuesta realizada presenta un comportamiento geotécnico estable según el análisis dinámico sísmico realizado.

## Conclusiones

- La evaluación del comportamiento sísmico geotécnico en los depósitos de relave abandonados en Ticapampa revela que existen deformaciones y fallas significativas debido a la inestabilidad de los depósitos. El análisis dinámico realizado con el programa Quake/W muestra un desplazamiento máximo de 0.515 m en la superficie de la sección crítica de los depósitos en su condición actual.
- La caracterización adecuada de las propiedades y parámetros geotécnicos y dinámicos del modelo geométrico es fundamental en el análisis dinámico bidimensional. Esto implica una correcta caracterización de los estratos de materiales que conforman los depósitos de relave, tanto en términos de datos de campo como de pruebas de laboratorio. Esto garantiza resultados más realistas y confiables que se ajustan al comportamiento real en el campo.
- El análisis dinámico bidimensional revela una considerable amplificación de la aceleración desde el estrato rocoso hasta la superficie del depósito, con una amplificación sísmica de 5.89. Esto genera una gran deformación en el comportamiento de los depósitos de relave y resulta en su inestabilidad.
- El análisis de estabilidad de los taludes posteriores al sismo en la condición actual, utilizando el método de integración de Newmark, arroja un factor de seguridad de 0.985 y una deformación permanente máxima de 47.12 cm. Esto indica que el talud analizado en la condición actual es inestable y presenta una deformación significativa. Sin embargo, la evaluación de la propuesta de estabilización de los depósitos muestra una adecuada estabilidad física y una deformación permanente máxima de 11.83 cm, con un factor de seguridad de 1.513.
- Al comparar los resultados del análisis dinámico con los obtenidos mediante el método de la deformación permanente de Newmark, se observa que los desplazamientos máximos son similares y compatibles. Los desplazamientos máximos que ocurren en los depósitos de relave en la condición actual son cuantificados y considerados en el análisis dinámico sísmico realizado con el programa Quake/W.

## Recomendaciones

- Se sugiere realizar una comparativa exhaustiva entre los análisis bidimensionales dinámicos propuestos en este estudio y otros modelos, métodos y programas empleados a nivel internacional para abordar problemas geotécnicos. De esta manera, se podrá contar con modelos más idóneos y ajustados a la caracterización geotécnica de nuestra realidad, lo que permitirá obtener soluciones más reales y adecuadas para garantizar la estabilidad física frente a eventos sísmicos de gran magnitud presentes en los pasivos ambientales mineros en el Perú.
- Es fundamental que las entidades responsables lleven a cabo la implementación de la propuesta de condición estabilizada planteada en esta investigación como una alternativa para garantizar la estabilidad física de los depósitos de relave abandonados en Ticapampa. Esto es crucial para prevenir y mitigar los daños ambientales que se generarían debido a la inestabilidad, falla y ruptura de dichos depósitos durante un evento sísmico.
- Se sugiere incluir, en las guías de la ley y reglamento de cierre de pasivos ambientales mineros, así como en las normas ambientales correspondientes, el análisis dinámico bidimensional con



consideración de los efectos sísmicos para evaluar y analizar la estabilidad física de los depósitos de relave.

- Como una continuación a la línea de investigación abordada en este estudio, se recomienda explorar futuros estudios en el ámbito del análisis dinámico sísmico. Estos nuevos estudios deberían abordar aspectos como el cambio de comportamiento de las propiedades geotécnicas y dinámicas de los materiales debido a factores como la densificación natural de los depósitos de relave, el envejecimiento de los materiales, entre otros. Asimismo, se plantea la necesidad de considerar el análisis dinámico tridimensional en la evaluación de los depósitos de relave.



Capítulo V

**Fuerzas sísmicas y los  
depósitos de relave**

Los depósitos de relave están expuestos a fuerzas sísmicas durante terremotos, lo que puede afectar su estabilidad y seguridad. Estas fuerzas generan desplazamientos y vibraciones en el depósito. En este sentido, el comportamiento sísmico depende de su geometría, altura, contenido de agua y características del material de relave. Para ello, se utilizan análisis dinámicos que buscan evaluar la respuesta sísmica y determinar los niveles de aceleración y deformación. De este modo, se implementan medidas de mitigación como estructuras de contención robustas, mejoramiento del suelo, drenaje y monitoreo en tiempo real. Estas medidas garantizan la estabilidad y seguridad de los depósitos de relave durante eventos sísmicos (Avellaneda-Puri y Avellaneda-Cristóbal, 2020).

### **5.1. Respuestas sísmicas y dinámicas en estructuras geotécnicas**

Según Reyes *et al.* (2020), las respuestas sísmicas y dinámicas en estructuras geotécnicas se refieren al comportamiento y la respuesta de estas estructuras frente a cargas sísmicas, como terremotos o vibraciones inducidas por la actividad humana. Las estructuras geotécnicas incluyen, entre otras, presas, muros de contención, cimentaciones, taludes y depósitos de relaves. Durante un evento sísmico, las estructuras geotécnicas están expuestas a fuerzas dinámicas significativas que pueden afectar su estabilidad y comportamiento. La respuesta sísmica y dinámica de estas estructuras implica el estudio de parámetros como la aceleración, la velocidad, la deformación, las tensiones y las fuerzas que se generan en el suelo y en la estructura misma.

La evaluación de las respuestas sísmicas y dinámicas en estructuras geotécnicas implica el uso de técnicas de análisis geotécnico y sísmico. Estas técnicas incluyen métodos numéricos, modelos de elementos finitos y análisis dinámico de estructuras. Mediante estos análisis, se pueden simular y predecir las respuestas de la estructura ante diferentes escenarios sísmicos. La comprensión de las respuestas sísmicas y dinámicas es esencial para el diseño, la construcción y el mantenimiento seguro de estructuras geotécnicas. Permite evaluar la estabilidad, la capacidad de carga y la resistencia sísmica de las estructuras, y ayuda a identificar las zonas de mayor riesgo y establecer medidas de mitigación adecuadas (Sucasaca y Sáez, 2022).

En síntesis, las respuestas sísmicas y dinámicas en estructuras geotécnicas se refieren al estudio del comportamiento y la respuesta de estas estructuras frente a cargas sísmicas. La evaluación de estas respuestas es fundamental para garantizar la estabilidad, la seguridad y el rendimiento adecuado de las estructuras geotécnicas, y se basa en técnicas de análisis geotécnico y sísmico.

### **5.2. Importancia del programa Quake/W en el análisis dinámico**

El programa Quake/W es una herramienta de *software* ampliamente utilizada en la ingeniería geotécnica para el análisis dinámico de estructuras frente a cargas sísmicas. Su importancia radica en su capacidad para simular y evaluar el comportamiento de las estructuras geotécnicas durante eventos sísmicos, proporcionando información crucial para el diseño y la seguridad de estas (Reyes *et al.*, 2020).

A continuación, se presentan algunas de las razones que destacan la importancia del programa Quake/W en el análisis dinámico:



### *Análisis sísmico avanzado*

Reyes *et al.* (2020) plantean que el programa Quake/W proporciona capacidades avanzadas para el análisis sísmico de estructuras geotécnicas, permitiendo simular y evaluar el comportamiento de las estructuras frente a cargas sísmicas de manera detallada. Reyes (2019) sostiene algunas de las características y funcionalidades que hacen que el análisis sísmico con Quake/W sea avanzado son las siguientes:

- **Modelado de terremotos.** Quake/W permite importar registros sísmicos reales o generar eventos sísmicos artificiales para simular cargas sísmicas en el análisis. Esto permite tener en cuenta la amplitud, la duración y la frecuencia específicas del terremoto que se está considerando.
- **Modelado del suelo.** El programa ofrece opciones avanzadas para modelar el comportamiento del suelo durante un terremoto. Se pueden considerar las propiedades dinámicas del suelo, como la velocidad de onda, la amplificación sísmica y la disipación de energía, mediante la incorporación de modelos constitutivos y de interacción suelo-estructura.
- **Análisis dinámico no lineal.** Quake/W permite realizar análisis dinámicos no lineales, teniendo en cuenta la respuesta no lineal del suelo y de las estructuras. Esto es particularmente importante en el caso de suelos y estructuras que pueden experimentar comportamientos no lineales bajo cargas sísmicas, como la plasticidad del suelo o la formación de fisuras y desplazamientos importantes en las estructuras.
- **Modelado de estructuras complejas.** El programa es capaz de modelar estructuras geotécnicas complejas, como muros de contención, presas, cimentaciones o depósitos de relaves, teniendo en cuenta su geometría, materiales y condiciones de apoyo. Esto permite simular con precisión la respuesta dinámica de estas estructuras durante un terremoto.
- **Evaluación de resultados.** Quake/W proporciona herramientas para la evaluación de los resultados del análisis sísmico, como las deformaciones, las tensiones y las fuerzas internas generadas en la estructura. También ofrece opciones para visualizar los resultados en forma de gráficos y animaciones, lo que facilita la interpretación y comunicación de los hallazgos.

### *Evaluación de la respuesta estructural*

Reyes *et al.* (2020) detallan que la evaluación de la respuesta estructural mediante el programa Quake/W permite analizar y comprender cómo una estructura geotécnica responde a cargas sísmicas específicas. Quake/W ofrece diversas funcionalidades para evaluar y visualizar la respuesta estructural durante un evento sísmico. Seguidamente, Mesa *et al.* (2021) destacan algunos aspectos clave de la evaluación de la respuesta estructural con Quake/W:

- a. **Modelado de la estructura.** Quake/W permite modelar la geometría y los materiales de la estructura de manera detallada. Se pueden definir elementos finitos, como vigas,

columnas, losas, así como también elementos más especializados para estructuras geotécnicas, como pilotes o anclajes.

- b. Análisis dinámico.** El programa realiza un análisis dinámico de la estructura, considerando las características del terremoto y las propiedades dinámicas del suelo. Utiliza métodos numéricos avanzados para calcular la respuesta de la estructura en términos de aceleraciones, velocidades, deformaciones y fuerzas internas generadas durante el evento sísmico.
- c. Evaluación de la estabilidad y seguridad.** Quake/W permite evaluar la estabilidad y la seguridad de la estructura durante el evento sísmico. Se pueden analizar aspectos como la capacidad de carga, la resistencia a la flexión, el desplazamiento máximo, la distribución de tensiones, entre otros.
- d. Análisis de modos de vibración.** Quake/W facilita el análisis de los modos de vibración de la estructura, lo que permite comprender cómo responde la estructura a diferentes frecuencias de excitación sísmica. Esto ayuda a identificar los modos dominantes de vibración y evaluar su influencia en el comportamiento global de la estructura.
- e. Interpretación de resultados.** Quake/W ofrece herramientas de visualización y análisis de resultados que facilitan la interpretación de los datos generados. Se pueden generar gráficos, diagramas de contorno y animaciones que ayudan a comprender la respuesta estructural en diferentes puntos y momentos durante el evento sísmico.

#### *Modelado de materiales geotécnicos*

Reyes *et al.* (2020) sostiene que el programa Quake/W ofrece capacidades avanzadas para el modelado de materiales geotécnicos, lo que permite simular de manera precisa y realista el comportamiento de los suelos y otros materiales geotécnicos durante un evento sísmico. Estas capacidades son fundamentales para comprender la respuesta sísmica de las estructuras geotécnicas y evaluar su estabilidad y seguridad. Oliva-González (2019) presenta algunas características clave del modelado de materiales geotécnicos en Quake/W:

- a. Modelos constitutivos.** Quake/W proporciona una amplia gama de modelos constitutivos para representar el comportamiento de los materiales geotécnicos. Estos modelos incluyen elásticos lineales, elastoplásticos, hipoplásticos, modelos de consolidación y modelos de falla, entre otros. Cada modelo se basa en ecuaciones matemáticas y propiedades específicas del material para describir su respuesta frente a las cargas sísmicas.
- b. Propiedades del suelo.** El programa permite definir las propiedades del suelo de manera detallada, como la densidad, la porosidad, la permeabilidad, la resistencia al corte, el coeficiente de fricción y la cohesión. Estas propiedades se utilizan en los modelos constitutivos para simular el comportamiento del suelo bajo cargas sísmicas, teniendo en cuenta su respuesta no lineal, la deformación y la interacción con la estructura.
- c. Anisotropía y heterogeneidad.** Quake/W tiene la capacidad de considerar la anisotropía y heterogeneidad del suelo al modelar materiales geotécnicos. Esto significa que se pueden tener en cuenta las características específicas del suelo, como la orientación de

los estratos, la variabilidad espacial de las propiedades y las discontinuidades geotécnicas. Estas características influyen en la respuesta sísmica de la estructura y pueden ser consideradas en el modelado.

- d. Interacción suelo-estructura.** Quake/W permite simular la interacción entre el suelo y la estructura durante un evento sísmico. Esto implica considerar la transferencia de cargas entre el suelo y la estructura, así como los efectos de la deformación del suelo en la respuesta estructural.
- e. Verificación y calibración.** Quake/W proporciona herramientas para verificar y calibrar los modelos geotécnicos utilizados en el análisis. Esto implica comparar los resultados del modelo con datos de campo, ensayos de laboratorio u otros estudios geotécnicos para asegurar que el modelo represente adecuadamente el comportamiento del suelo.

### *Optimización del diseño*

Reyes *et al.* (2020) exponen que la optimización del diseño es un aspecto crucial en la ingeniería geotécnica para garantizar estructuras seguras y eficientes. El programa Quake/W ofrece funcionalidades que permiten realizar análisis paramétricos y evaluaciones de sensibilidad, lo que facilita la optimización del diseño de estructuras geotécnicas frente a cargas sísmicas. Por su lado, Reyes (2019) detalla algunas formas en las que Quake/W contribuye a la optimización del diseño:

- a. Análisis paramétricos.** Quake/W permite realizar análisis paramétricos en los que se varían los parámetros del diseño, como las dimensiones de la estructura, las propiedades del suelo o los materiales utilizados. Esto permite evaluar cómo diferentes configuraciones y combinaciones de parámetros afectan la respuesta estructural y la seguridad sísmica.
- b. Evaluaciones de sensibilidad.** Quake/W también ofrece la posibilidad de realizar evaluaciones de sensibilidad, donde se analiza el impacto de cambios en un parámetro específico sobre la respuesta estructural. Por ejemplo, se pueden evaluar los efectos de variar la resistencia del suelo, la rigidez de la estructura o la ubicación de la carga sísmica.
- c. Diseño basado en desempeño.** Quake/W permite implementar enfoques de diseño basado en desempeño, que se centran en establecer metas específicas de desempeño y evaluar si la estructura cumple con ellas. Estas metas pueden incluir limitaciones de deformación, desplazamiento máximo o reducción de daños.
- d. Evaluación de medidas de mitigación.** Quake/W es útil para evaluar la eficacia de medidas de mitigación sísmica implementadas en el diseño de estructuras geotécnicas. Estas medidas pueden incluir sistemas de aislamiento sísmico, dispositivos de amortiguamiento o técnicas de refuerzo.
- e. Análisis de costos.** Quake/W también puede integrarse con herramientas de análisis de costos, lo que permite evaluar el impacto económico de diferentes diseños. Al considerar los costos asociados con los materiales, la construcción, el mantenimiento y los posibles daños por eventos sísmicos, es posible tomar decisiones informadas y optimizar el diseño en función de los aspectos económicos.

Reyes *et al.* (2020) resaltan que la evaluación de medidas de mitigación sísmica es una parte fundamental en el diseño de estructuras seguras y resilientes. El programa Quake/W proporciona herramientas y funcionalidades para llevar a cabo esta evaluación y determinar la eficacia de las medidas de mitigación implementadas. Oliva-González (2019) describe los pasos clave en la evaluación de medidas de mitigación utilizando Quake/W:

- a. Modelado de la estructura.** En primer lugar, se debe modelar la estructura en Quake/W, teniendo en cuenta su geometría, materiales y sistemas de mitigación implementados. Esto implica definir los elementos estructurales, sus propiedades mecánicas y las conexiones entre ellos.
- b. Definición de eventos sísmicos.** A continuación, se seleccionan y definen los eventos sísmicos que se utilizarán para la evaluación. Quake/W permite introducir registros de aceleración sísmica históricos o generar eventos sintéticos basados en especificaciones de diseño.
- c. Análisis de referencia.** Antes de evaluar las medidas de mitigación, se realiza un análisis de referencia sin la implementación de dichas medidas. Esto proporciona una base de comparación para evaluar la efectividad de las medidas en la reducción de la respuesta sísmica de la estructura.
- d. Análisis con medidas de mitigación.** Una vez completado el análisis de referencia, se procede a implementar las medidas de mitigación en el modelo de Quake/W. Esto implica introducir las propiedades y características específicas de las medidas de mitigación en el modelo. Luego, se realiza un nuevo análisis utilizando los eventos sísmicos definidos previamente para evaluar la respuesta de la estructura con las medidas de mitigación implementadas.
- e. Comparación de resultados.** Después de completar el análisis con medidas de mitigación, se comparan los resultados obtenidos con los del análisis de referencia. Se evalúan parámetros relevantes, como desplazamientos, aceleraciones, fuerzas internas y niveles de daño, para determinar la eficacia de las medidas de mitigación en la reducción de la respuesta sísmica de la estructura.
- f. Optimización y ajuste.** En función de los resultados obtenidos, es posible realizar ajustes y optimizaciones en las medidas de mitigación. Esto puede implicar modificar parámetros, cambiar el tipo de medida o ajustar su implementación.

### **5.3. Medidas preventivas sísmicas para la construcción de depósitos de relave**

La construcción de depósitos de relave implica considerar medidas preventivas sísmicas para garantizar la seguridad y estabilidad de estas estructuras frente a eventos sísmicos (Emerman, 2022). En este sentido, se exponen algunas de las medidas preventivas comunes:

- a. Estudio de amenaza sísmica.** Antes de la construcción de un depósito de relave, es fundamental realizar un estudio detallado de la amenaza sísmica en la ubicación

específica del proyecto. Esto implica evaluar la actividad sísmica histórica y potencial en la región, así como determinar los niveles de aceleración y las características del terremoto esperadas (Rey y Quintana, 2020).

- b. Diseño sísmico adecuado.** Los depósitos de relave deben ser diseñados considerando las cargas sísmicas esperadas. Esto involucra tener en cuenta el tamaño y la geometría del depósito, así como la resistencia y rigidez de los materiales utilizados (Zora-Mejía y Acevedo-Jaramillo, 2019).
- c. Caracterización del suelo.** Es importante llevar a cabo una caracterización exhaustiva del suelo donde se construirá el depósito de relave. Esto incluye estudios geotécnicos para determinar las propiedades del suelo, como la resistencia, la compresibilidad y la densidad, que son relevantes para el comportamiento sísmico del depósito (Lizarazo *et al.*, 2020).
- d. Selección de ubicación adecuada.** La selección de la ubicación del depósito de relave también puede ser una medida preventiva sísmica. Se deben evitar áreas propensas a actividad sísmica intensa o terrenos inestables (Rey, 2019).
- e. Diseño y construcción de estructuras de contención.** Las estructuras de contención, como los muros de contención y las barreras de drenaje, deben ser diseñadas y construidas de manera adecuada para resistir los efectos sísmicos (Zora-Mejía y Acevedo-Jaramillo, 2019).
- f. Monitoreo y mantenimiento.** Es fundamental establecer un programa de monitoreo continuo para evaluar el comportamiento del depósito de relave durante y después de eventos sísmicos (Zandarín, 2021).
- g. Planes de emergencia y contingencia.** Ante la posibilidad de un evento sísmico, se deben establecer planes de emergencia y contingencia para proteger la vida y minimizar los daños (Rey y Quintana, 2020).



## Referencias bibliográficas

- Aliaga, M. (2022). Estudio numérico de la respuesta sísmica de un embalse de relaves construido con arcillas de baja plasticidad [tesis de titulación, Universidad de Talca]. Repositorio Institucional Utalca. <http://dspace.otalca.cl/handle/1950/12928>
- Alonso, L. (2020). *Análisis del efecto del endurecimiento por deformación y la ductilidad del material en pórticos de acero inoxidable* [trabajo de maestría, Universitat Politècnica de Catalunya]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/2117/190724>
- Alva, J. (2004). *Obras de abandono depósitos de relave en Casapalca*. II Congreso Internacional de la Construcción. ICG.
- Alvarez, M., Mederos, V., Hernández, M., y Matamoros, R. (2020). Evaluación de las deformaciones y su pronóstico en el Turbo Generador 5 de la planta termo-energética de Nuevitas, Camagüey. *Enfoque UTE*, 11(4), 116-131. <https://doi.org/10.29019/enfoqueute.v11n4.636>
- Araya-Letelier, G., Parra, P., Lopez-Garcia, D., Garcia-Valdes, A., Candia, G., y Lagos, R. (3-5 de abril de 2019). *Evaluación de la probabilidad de colapso de un edificio de oficinas chileno de hormigón armado debido a actividad sísmica*. XII Congreso Chileno de Sismología e Ingeniería Sísmica ACHISINA 2019, Valdivia, Chile. <https://bit.ly/43ck9qS>
- Araya, V., Suazo, G., Villavicencio, G., y Silva, M. (2019). Monitoreo de la humedad en depósitos de relave a partir de mediciones de reflexión de luz. *Obras y Proyectos*, (25), 35-41. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132019000100035>
- Avellaneda-Puri, P., y Avellaneda-Cristóbal, C. (2020). Evaluación de la estabilidad física del depósito integrado de relaves San Andrés (Perú). *Minería y Geología*, 36(1). [http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1993-80122020000100033&script=sci\\_arttext&tlng=en](http://scielo.sld.cu/scielo.php?pid=S1993-80122020000100033&script=sci_arttext&tlng=en)
- Beigt, D., Villarosa, G., De Luca, L., Barbosa, A., Gómez, E., y Raniolo, L. (2023). Inestabilidad de costas asociada a fenómenos gravitacionales en grandes lagos patagónicos: un análisis de eventos recientes. *Revista de la Asociación Geológica Argentina*, 80. <https://revista.geologica.org.ar/raga/article/view/1649>
- Boada, G., Pastén, C., y Heresi, P. (22-24 de noviembre de 2021). *Desarrollo de curvas de fragilidad para depósitos de relaves abandonados en la zona centro-norte de Chile*. XI Congreso Chileno de Geotecnia, Talca, Chile. <https://bit.ly/3oz2MSh>
- Brahian, R. (2019). Estudio del comportamiento monotónico no drenado de relaves de aluminio. *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*, 2063-2070. <https://ebooks.iospress.nl/doi/10.3233/STAL190267>

- Camacho-Garito, E., Aguiar-Moya, J., y Loría-Salazar, L. (2019). *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*, 1486-1493. <https://ebooks.iospress.nl/doi/10.3233/STAL190198>
- Cárdenas, J. (2001). *Plan de abandono de depósitos de relave en la zona de Casapalca* [tesis de licenciatura, Universidad Nacional de Ingeniería]. Repositorio Institucional. <https://renati.sunedu.gob.pe/handle/sunedu/3262045>
- Carlos, J. (2022). *Evaluación geotécnica para la construcción de la Presa Ucuscancha I, Huancayo – Junín* [tesis de licenciatura, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional UNDAC. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2615>
- Cerda, V. (2022). *Propuesta de monitoreo geotécnico Avanzado para depósitos de relaves* [tesis de licenciatura, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional Uchile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/188813>
- Chamorro-Zurita, C., y Fernández-Lavín, A. (2022). Comportamiento esfuerzo-deformación del suelo: evolución e importancia. *Investigación & Desarrollo*, 15(1), 116-131. <https://doi.org/10.31243/id.v15.2022.1597>
- Chi, L., & Kushwaha, R. (1988). Study of mechanical properties of agricultural soil for non-linear F.E. model. En *Annual International Meeting*. ASAE.
- Coronel, D. (2021). *Análisis por elementos finitos del deslizamiento de tierras de la presa de Yesa (Navarra)* [tesis de licenciatura, Universitat Politècnica de Catalunya]. <http://hdl.handle.net/2117/358188>
- De la Cruz, I. (2011). *Peligro sísmico probabilístico y espectro uniforme en la región Áncash* [tesis de licenciatura, Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo].
- De la Cruz, Y., y Valderrama, E. (2021). *Evaluación del riesgo de deslizamiento de un depósito de relave inoperativo en la Cabecera de cuenca del Río Rímac, Chicla – Huarochirí – Lima considerando variables geotécnicas en el proceso de análisis jerárquico* [tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Institucional UPC. <http://hdl.handle.net/10757/658816>
- Desai, C., & Siriwardane, H. (1984). *Constitutive laws for engineering materials: With emphasis on geologic materials*. Prentice-Hall, Inc.
- División El Teniente-Codelco. (2020). *Agua y relaves. Una mirada de futuro. Estrategia de gestión hídrica y de relaves DET 2050*. División El Teniente-Codelco.
- Emerman, S. (2022). *Evaluación de la instalación de almacenamiento de relaves filtrados en la Mina de Oro y Plata Propuesta Cerro Blanco, sur de Guatemala*. Heinrich Böll Stiftung.
- Enríquez Haro, J., y Rojas González, E. (2021). Un modelo acoplado para simular el comportamiento de suelos no saturados. *Perspectivas de la Ciencia y la Tecnología*, 4(7), 59-76. <https://revistas.uaq.mx/index.php/perspectivas/article/view/277>
- Guerrero, E., y Rojas, E. (2019). *Análisis estructural de un edificio educativo de seis pisos con sistemas de disipación de energía de amortiguadores de fluido viscoso en una zona de amenaza sísmica alta* [tesis



de licenciatura, Universidad de Santander]. Repositorio Institucional UDES. <https://repositorio.udes.edu.co/handle/001/4570>

Gutierrez, M. (2019). *Interacción suelo-estructura en base a modelos dinámicos - Norma Rusa SNIP 2.02.05-87 y A.E. Sargsian* [tesis de licenciatura, Universidad Peruana Unión]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/20.500.12840/2341>

Helwany, S. (2007). *Applied soil mechanics with Abaqus applications*. John Wiley & Sons, Inc.

Hernández, D., Díaz, J., Santos, O., Morciego, H., y García, J. (2022). Métodos de diagnóstico para la evaluación geotécnica de vías urbanas en centros históricos cubanos. *Revista de Arquitectura e Ingeniería*, 16(2). <https://www.redalyc.org/articulo.oa?id=193971847003>

Huaranga, F., Rodríguez, E., Méndez, E., y Bernuí, F. (2021). Especies bioindicadoras de contaminación por relaves mineros en el Sector Samne, La Libertad-Perú, 2021. *Arnaldoa*, 28(3), 633-650. [http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2413-32992021000300633&script=sci\\_arttext](http://www.scielo.org.pe/scielo.php?pid=S2413-32992021000300633&script=sci_arttext)

Juárez, G., y Ortiz, P. (2021). Importancia del mallado de elementos finitos de muros de mampostería confinada en el análisis sísmico de edificios. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 26(4), 712-745. <https://doi.org/10.24133/riie.v26i4.2640>

Labbe, G. (2019). *Perfiles conformados en frío: consideraciones sísmicas bajo NCh2369.Of2003* [tesis de licenciatura, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional Uchile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/173834>

Leal, J., y Fernandois, G. (2019). Desempeño sísmico de muros de corte de placa de acero utilizando elementos finitos tipo cascara. *Cuadernos de Mecánica Computacional*, 18(1), 1-10. <https://bit.ly/42cc5VS>

Liao, K., & Whitman, R. (1985). Overburden Corrections Factors for SPT in Sand. *Journal of Geotech. Eng. Division, ASCE*, 112(3), 373-377.

Liu, J. (1995). Investigation of the stress-strain relationship of sand. *Journal of Terramech*, 32(5), 221-230.

Lizarazo, M., Díaz, J., Zorrilla, J., Londoño, J., y Ospina, V. (2020). Determinación de la frecuencia fundamental del suelo usando la técnica de relaciones espectrales de Nakamura con sismos registrados caso: Calará y Uniquindío. *Encuentro Internacional de Educación en Ingeniería ACOFI*, 1-5. <https://doi.org/10.26507/ponencia.827>

Martínez, J., y Franco, E. (2019). Propuesta de modelo de optimización de tiempo de vida útil de depósito de relaves espesados. *Ingeniare. Revista Chilena de Ingeniería*, 27(2), 236-245. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-33052019000200236>

Martínez, V., Nungaray, C. (2019). Evaluación del desempeño sísmico de edificaciones compuestas rígidas de acero en zonas hondureñas de alto peligro sísmico. *Informes de la Construcción*, 71(556), e314. <https://doi.org/10.3989/ic.64333>

- Mesa, F., Devia-Narváez, D., y Ospina-Ospina, R. (2023). Solución de la ecuación de flujo de tráfico usando el método de elementos finitos. *Revista UIS Ingenierías*, 22(2), 65-72. <https://doi.org/10.18273/revuin.v22n2-2023006>
- Mesa, M., Álvarez, J., y Chávez, J. (2021). Evaluación del factor de seguridad en taludes de terraplenes carreteros altos ante carga sísmica. *Ingeniería sísmica*, (103), 1-17. <https://doi.org/10.18867/ris.103.489>
- Meza, J. (2022). *Aumento de la vida útil de relavera mediante la evaluación de costos unitarios en el sistema de relleno hidráulico en la Mina Animón-Compañía Minera Chungar S.A.C.* [tesis de licenciatura, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional UNDAC. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2965>
- Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento (MVCS). (2018). *Norma Técnica de Edificación E. 030 "Diseño sismorresistente"*. Ministerio de Vivienda, Construcción y Saneamiento.
- Monje, C., y Suazo, G. (2019). Comportamiento cíclico drenado y diseño de revancha mínima en tranques de relaves. *Obras y Proyectos*, (25), 30-34. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132019000100030>
- Morales, M. (2021). *Confeción de modelos sustitutos para procesos de simulación geotécnicos y cuantificación de incertidumbre* [tesis de licenciatura, Universidad de Chile]. Repositorio Institucional Uchile. <https://repositorio.uchile.cl/handle/2250/182789>
- Moreno, R. (2023). Restauración geomorfológica sobre depósitos de relaves: caso de estudio aplicado a la concesión minera río Blanco, Ecuador. *La Granja*, 37(1). <https://doi.org/10.17163/lgr.n37.2023.10>
- Niquin, R. (2019). *Los relaves de la minera Uchucchacua y el impacto de la contaminación Ambiental en la provincial de Oyón y sus alrededores-2019* [tesis de licenciatura, Universidad Nacional José Faustino Sánchez Carrión]. Repositorio Institucional. <http://hdl.handle.net/20.500.14067/4784>
- Nishimura, S. (2014). *Assessment of anisotropic elastic parameters of saturated clay measured in triaxial apparatus: Appraisal of techniques and derivation procedures*. Soils and Foundations
- Oliva-González, A. (2019). Metodología para la predicción de las vibraciones del terreno inducidas por voladuras y sus efectos en las estructuras. Aplicación en un caso real. *Revista Ingenio*, 16(1), 1-9. <https://doi.org/10.22463/2011642X.2381>
- Parodi, M., Alencar, K., Pacheco, P., y Mera, E. (2022). Estudio comparativo de factores de emisión en relaves abandonados e inactivos y su contribución al inventario de PM<sub>10</sub>: el caso Andacollo, Región de Coquimbo, Chile. *Información tecnológica*, 33(2), 129-144. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-07642022000200129>
- Pinedo, A., y Soto, D. (2022). Comportamiento sísmico de edificaciones con sótanos, en la selva peruana-región Loreto. *Cátedra Villarreal Posgrado*, 1(2), 85-95. <https://eupgrevista.itdataperu.net/index.php/RCVP/article/view/4>
- Pinzon, T., y Rodriguez, E. (2020). *Evaluación geotécnica del Sistema constructivo del Canal de Panamá y la unidad funcional de navegabilidad (UFN) del río Magdalena en el tramo comprendido entre*

- Barrancabermeja y Puerto Salgar* [tesis de licenciatura, Universidad Católica de Colombia]. Repositorio Institucional. <https://hdl.handle.net/10983/25850>
- Quilodrán, C. (2021). *Distancia peligrosa tranque de relaves Las Palmas* [tesis de maestría, Pontificia Universidad Católica de Chile]. Repositorio Institucional UCCL. [https://masterieg.uc.cl/wp-content/uploads/2022/08/A\\_G\\_2021\\_Carlos\\_Quilodran.pdf](https://masterieg.uc.cl/wp-content/uploads/2022/08/A_G_2021_Carlos_Quilodran.pdf)
- Rey, N., y Quintana, O. (2020). Estudio general de la amenaza sísmica de la ciudad de Cúcuta durante el periodo 2018-2021. *Formación Estratégica*, 1(1), 71-82. <https://formacionestrategica.com/index.php/foes/article/view/13>
- Reyes, R. (2019). Análisis unidimensional de la respuesta sísmica local de suelos blandos en la ciudad de Huaraz. *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*, 2055-2062. <https://ebooks.iospress.nl/doi/10.3233/STAL190266>
- Reyes, R., Aranda, R., y Castillejo, R. (2020). Evaluación de efectos de amplificación topográfica del suelo debidos a la respuesta sísmica en laderas de las urbanizaciones Shancayán y Nueva Esperanza de la ciudad de Huaraz en el año 2018. *Aporte Santiaguino*, 13(1), 35-41. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=8460625>
- Rocio, Y. (2022). *Interacción suelo-estructura para la obtención de la respuesta sísmica de la subestructura con columnas de grava del puente en la Avenida Sánchez Cerro, Piura* [tesis de maestría, Universidad Ricardo Palma]. Repositorio Institucional URP. <https://hdl.handle.net/20.500.14138/5355>
- Rodríguez, E. (2022). *Diseño de una tubería de descarga de un cortador primario para pulpa en la mina Chinalco* [tesis de licenciatura, Universidad Nacional Mayor de San Marcos]. Repositorio Institucional UNMSM. <https://hdl.handle.net/20.500.12672/19084>
- Rojas, E., y Riveros, M. (2020). *Evaluación estructural de edificios de uso multifamiliar diseñados con la Norma sismorresistente E.030 1977 utilizando la Norma E.030 2016* [tesis de licenciatura, Universidad Peruana de Ciencias Aplicadas]. Repositorio Institucional UPC. <http://hdl.handle.net/10757/651680>
- Romero-Romero, E. y Almache-Sanchez, L. (2022). Evaluación estructural de la iglesia patrimonial El Tambo considerando base rígida e Interacción dinámica suelo estructura. *Polo del Conocimiento*, 7(12), 3-23. <https://www.polodelconocimiento.com/ojs/index.php/es/article/view/4979>
- Salvador, E. (2020). Cálculo sísmico de túneles mediante modelos numéricos avanzados. *Revista de Obras Públicas: Organo profesional de los ingenieros de caminos, canales y puertos*, (3624), 26-35. <https://dialnet.unirioja.es/servlet/articulo?codigo=7684668>
- Sánchez, M., Suazo, G., Araya, V., y Villavicencio, G. (2022). Estudio de la relación entre la reflexión de luz y el contenido de humedad superficial en muestras de relave utilizando imágenes hiperespectrales. *Obras y Proyectos*, (31), 77-84. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132022000100077>
- Seed, H., y Idriss, I. (1969). Influence of Soils Conditions on Ground Motions During Earthquake. *Journal of the Soil Mechanics and Foundations Division, ASCE*, 95(SM1), 99-137.
- Seed, H., y Idriss, I. (1970). Soil Moduli and Damping Factors for Dynamic Response Analyses. *Earthquake Engineering Research Center*.

- Seed, H., Tokimatsu, K., Harder, L., y Chung, R. (1984). The Influence of SPT Procedures in Soil Liquefaction Resistance Evaluations. *Journal of Geotechnical Engineering*, 111(12), 1425. [http://dx.doi.org/10.1061/\(ASCE\)0733-9410\(1985\)111:12\(1425\)](http://dx.doi.org/10.1061/(ASCE)0733-9410(1985)111:12(1425))
- Silva-Contreras, D., y Ochoa-Cornejo, F. (2022). Efecto de los finos no plásticos en la respuesta no drenada de una arena de relaves a altas presiones. *Obras y Proyectos*, (32), 18-24. <http://dx.doi.org/10.21703/0718-51620202203202>
- Sucasaca, J., y Sáez, E. (2022). Efectos topográficos, de sitio e interacción estructura-suelo-estructura. Un caso de estudio. *Obras y Proyectos*, (31), 59-67. <http://dx.doi.org/10.4067/S0718-28132022000100059>
- Sun, J., Goleorkhi, R., y Seed, H. (1988). Dynamic Moduli and Damping Ratios for Cohesive Soils. *Journal of Geotechnical Engineering*, 112(11). <https://ascelibrary.org/doi/10.1061/%28ASCE%290733-9410%281986%29112%3A11%281016%29>
- Tena, A. (2019). Interacción suelo-estructura. Reflexiones sobre su importancia en la respuesta dinámica de estructuras durante sismo. *Revista Internacional de Ingeniería de Estructuras*, 24(2), 141-165. <https://doi.org/10.24133/riie.v24i2.1282>
- Vargas, M. (2020). *Asimilación y evaluación de Pb, Cd, Fe y Zn en los relaves de Quiulacocha utilizando procesos de cobertura biológica-2019* [tesis de licenciatura, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional UNDAC. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/1890>
- Vega, R. (2022). *Evaluación Geotécnica del depósito de desmonte Excélsior de Cerro de Pasco, 2020* [tesis de licenciatura, Universidad Nacional Daniel Alcides Carrión]. Repositorio Institucional UNDAC. <http://repositorio.undac.edu.pe/handle/undac/2707>
- Verdugo, R., y González, J. (2019). Efecto de la magnitud del sismo en la ocurrencia de licuefacción. *Geotechnical Engineering in the XXI Century: Lessons learned and future challenges*, 2145-2153. <https://ebooks.iospress.nl/doi/10.3233/STAL190277>
- Vick, S. (1990). *Planning, Design and Analysis of Tailings Dams*. BiTech Publishers Ltd.
- Vilca, D., y Obregón, C. (2023). *Evaluación estructural sísmico de las instalaciones de la gerencia de ingeniería de la entidad prestadora de servicio de saneamiento, Tacna, 2022* [tesis de licenciatura, Universidad Privada de Tacna]. Repositorio Institucional UPT. <http://hdl.handle.net/20.500.12969/2706>
- Wilson, E. (1968). *A computer program for the dynamic stress analysis of underground structures*. University of California Berkeley.
- Zandarín, M. (2021). Normativa, gestión de riesgos y experiencia sobre depósitos de relaves en Chile. *Revista trimestral de Ciencias de la Tierra*, 132(4), 573-581. <https://doi.org/10.21701/bolgeomin.132.4.012>
- Zora-Mejía, F., y Acevedo-Jaramillo, A. (2019). Índice de vulnerabilidad sísmica de escuelas del Área Metropolitana de Medellín, Colombia. *Revista EIA*, 16(32), 195-207. <https://doi.org/10.24050/reia.v16i32.1035>

## Datos de los autores

Nombre completo: Reynaldo Melquiades Reyes Roque  
Afilación: Universidad Nacional Santiago Antúnez de Mayolo  
Correo institucional: rreyesr@unasam.edu.pe  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-9408-0069>

Nombre completo: Santiago Alberto Casas Luna  
Afilación: Universidad Nacional de San Martín, Facultad de Ecología.  
Correo institucional: scasasl@unsm.edu.pe  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0003-3755-4093>

Nombre completo: Carlos Enrique Coacalla Castillo  
Afilación institucional: Universidad Nacional Micaela Bastidas de Apurímac/Universidad Andina del Cusco  
Correo electrónico institucional: [ccoacalla@unamba.edu.pe](mailto:ccoacalla@unamba.edu.pe) /  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6076-1800>

Nombre: César Gerardo León Velarde  
Afilación: Universidad Tecnológica del Perú  
Correo institucional: [C19593@utp.edu.pe](mailto:C19593@utp.edu.pe)  
ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-8273-1995>

