



**UNIVERSIDAD AUTÓNOMA METROPOLITANA**  
**UNIDAD AZCAPOTZALCO**

---

---

DIVISIÓN DE CIENCIAS BÁSICAS E INGENIERÍA  
POSGRADO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL

**EFFECTO DE LA TRANSICIÓN AL MECANISMO  
PLÁSTICO EN LA INESTABILIDAD DINÁMICA DE  
MARCOS PLANOS**

**T E S I S**

QUE PARA OBTENER EL GRADO DE

**MAESTRO EN INGENIERÍA ESTRUCTURAL**

P R E S E N T A

**GERARDO DÍAZ MARTÍNEZ**

DIRECTOR DE TESIS: **DR. EMILIO SORDO ZABAY**

MÉXICO, D. F.

OCTUBRE DE 2005

## **RESUMEN.**

El presente trabajo evalúa la importancia de la transición del estado elástico al estado plástico de estructuras sometidas a movimientos fuertes de terreno en el umbral de la inestabilidad dinámica. Estudios previos muestran que el nivel de seguridad contra inestabilidad dinámica depende de la forma del mecanismo y de la sobrerresistencia, de ahí que el presente estudio se enfoque en determinar si la formación paulatina de articulaciones plásticas en la estructura afecta al factor de seguridad contra inestabilidad dinámica.

El trabajo se divide en dos partes principalmente; en primer lugar el estudio de una serie de marcos planos y en una segunda etapa un análisis paramétrico de Sistemas de un Grado de Libertad Trilineales (SUGLT). Tanto los sistemas estructurales como los SUGLT se someten a la acción de veinte registros acelerométricos y se estudia su comportamiento cercano al colapso por inestabilidad dinámica. Los registros acelerométricos utilizados en el desarrollo del trabajo se clasifican principalmente por el tipo de suelo del sitio donde fueron registrados y por la distancia de este sitio al epicentro del sismo en cuestión.

En los casos de estudio se observan diferencias de hasta el 50% en el factor de seguridad por inestabilidad dinámica para sistemas con las mismas propiedades elásticas, igual cortante último resistente y mecanismo plástico.

Dos observaciones resultan importantes y evidentes de los resultados fruto del trabajo realizado, en primer lugar se observa que los registros catalogados como de epicentro lejano son los que más incrementan el efecto de la transición del estado elástico al plástico en el factor de seguridad contra inestabilidad dinámica entre sistemas comparados, la segunda observación importante es que los sistemas con comportamiento elastoplástico perfecto muestran tener consistentemente un factor de seguridad más bajo que los sistemas con transición paulatina entre el comportamiento elástico y el plástico, lo que conduce a concluir que diseños basados en modelos elastoplásticos perfectos resulten siempre conservadores.

A mis abuelos:

Porfirio Díaz Ramírez.

Roberto Martínez Rubio.

# ÍNDICE.

	<b>Página.</b>
<b>CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.....</b>	<b>1</b>
<b>1.1 Alcance del trabajo.....</b>	<b>1</b>
<b>1.2 Antecedentes.....</b>	<b>2</b>
<b>1.3 Objetivos.....</b>	<b>9</b>
<b>1.4 Cuerpo del trabajo.....</b>	<b>10</b>
<b>CAPÍTULO 2. MARCOS PLANOS.....</b>	<b>12</b>
<b>2.1 Marcos de Referencia.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2 Obtención de los submodelos para cada Marco de Referencia.....</b>	<b>15</b>
<b>2.3 Obtención de las curvas de segundo ciclo de empujón histerético..</b>	<b>19</b>
<b>2.4 Trabajo Monotónico Máximo.....</b>	<b>22</b>
<b>2.5 Análisis dinámico de los marcos en estudio.....</b>	<b>24</b>
<b>2.5.1 Registro utilizados en el estudio.....</b>	<b>24</b>
<b>2.5.2 Cálculo del Coeficiente de Colapso Dinámico.....</b>	<b>25</b>
<b>CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD CON COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO TRILINEAL.....</b>	<b>33</b>
<b>3.1 Parámetros asociados a los Sistemas de un Grado de Libertad         Trilineales.....</b>	<b>33</b>
<b>3.2 Análisis dinámico de los SUGLT.....</b>	<b>34</b>
<b>3.2.1 Espectros de Resistencia de Colapso.....</b>	<b>35</b>
<b>3.2.2 Espectros de Trabajo Monotónico Máximo.....</b>	<b>37</b>
<b>3.2.3 Espectros de Energía Total Máxima de Colapso de los SUGLT.</b>	<b>38</b>
<b>3.3 Sistemas de un Grado de Libertad Trilineales. Análisis de         resultados.....</b>	<b>38</b>

<b>CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES.....</b>	<b>43</b>
<b>REFERENCIAS.....</b>	<b>45</b>
<b>ANEXO I.....</b>	<b>47</b>
<b>ANEXO II.....</b>	<b>59</b>
<b>ANEXO III.....</b>	<b>63</b>
<b>ANEXO IV.....</b>	<b>76</b>
<b>ANEXO V.....</b>	<b>89</b>

## LISTA DE FIGURAS.

	Página.
<b>Figura 1.1</b> Parámetros asociados a un Sistema de un Grado de Libertad Trilineal sometido al registro acelerométrico TAF021.....	3
<b>Figura 1.2</b> Respuesta dinámica de un Sistema de un Grado de Libertad con coeficiente de fluencia cinco veces mayor que el coeficiente de colapso con y sin efectos de la carga gravitacional.....	4
<b>Figura 1.3</b> Respuesta dinámica de un Sistema de un Grado de Libertad con coeficiente de fluencia dos y media veces mayor que el cortante de colapso con y sin efectos de la carga gravitacional.....	5
<b>Figura 1.4</b> Respuesta dinámica de un Sistema de un Grado de Libertad con coeficiente de fluencia 25% mayor que el coeficiente de colapso con y sin efectos de la carga gravitacional.....	6
<b>Figura 1.5</b> Respuesta dinámica de un Sistema de un Grado de Libertad con coeficiente de fluencia 5% mayor que el coeficiente de colapso con y sin efectos de la carga gravitacional.....	6
<b>Figura 1.6</b> Respuesta dinámica inestable y curva desplazamiento máximo de azotea vs. coeficiente basal de diseño para una marco plano con y sin carga gravitacional.....	7
<b>Figura 2.1</b> Vista en elevación de los marcos de acero objeto del estudio...	13
<b>Figura 2.2</b> Cortante Basal Último vs. Desplazamiento de Azotea para JAC05_1.....	15
<b>Figura 2.3</b> Mecanismo Plástico de los Marcos de Referencia.....	16
<b>Figura 2.4</b> Cortante Basal vs. Desplazamiento de Azotea para los Marcos de Referencia.....	16
<b>Figura 2.5</b> Curvas Cortante Basal vs. Desplazamiento de Azotea para los Marcos de Referencia con efecto $P-\Delta$ .....	17
<b>Figura 2.6</b> Parámetros asociados a la formación del mecanismo de los marcos en estudio.....	18

<b>Figura 2.7</b>	<b>Curva cortante basal vs. desplazamiento de azotea para una estructura sometida a proceso de empujón cíclico.....</b>	<b>19</b>
<b>Figura 2.8</b>	<b>Curvas cortante basal vs. desplazamiento de azotea de los modelos para el segundo ciclo histerético de empujón estático.....</b>	<b>21</b>
<b>Figura 2.9</b>	<b>Curva cortante basal contra desplazamiento de azotea submodelo JAC05_4.....</b>	<b>22</b>
<b>Figura 2.10</b>	<b>Trabajo bajo carga monotonica para el submodelo JAC05_4.</b>	<b>23</b>
<b>Figura 2.11</b>	<b>Coefficiente de Colapso (<math>C_c</math>) para la estructura JAC05_1 sometida a un análisis dinámico (registro SCT090).....</b>	<b>26</b>
<b>Figura 2.12</b>	<b>Amplificaciones por <math>P-\Delta</math> para diferentes Coeficientes Basales de diseño.....</b>	<b>28</b>
<b>Figura 3.1</b>	<b>Características de los Sistemas de un Grado de Libertad Trilineales en estudio.....</b>	<b>33</b>
<b>Figura 3.2</b>	<b>Definición del desplazamiento de colapso para los SUGLT....</b>	<b>36</b>
<b>Figura 3.3</b>	<b>Trabajo Monotónico Máximo de los SUGLT.....</b>	<b>37</b>
<b>Figura 3.4</b>	<b>Resistencia de Colapso para dos registros utilizados en el estudio, se muestra la diferencia entre el coeficiente de estabilidad mínimo y máximo.....</b>	<b>39</b>
<b>Figura 3.5</b>	<b>Resistencia de Colapso para dos registros utilizados en el estudio, se muestra la no dependencia del porcentaje del amortiguamiento crítico.....</b>	<b>40</b>
<b>Figura 3.6</b>	<b>Espectros de Resistencia, Trabajo Monotónico y Energía Total Máxima de Colapso para dos registros utilizados en el estudio.....</b>	<b>41</b>
<b>Figura 3.7</b>	<b>Espectros de Energía Total Máxima de Colapso para cuatro registros con diferente clasificación utilizados en el estudio...</b>	<b>42</b>
<b>Figura AI.1</b>	<b>Numeración de los elementos para cada marco de referencia.</b>	<b>47</b>
<b>Figura AII.1</b>	<b>Registros de epicentro cercano roca (CR).....</b>	<b>60</b>
<b>Figura AII.2</b>	<b>Registros de epicentro cercano suelo (CS).....</b>	<b>60</b>
<b>Figura AII.3</b>	<b>Registros de epicentro lejano roca (LR).....</b>	<b>61</b>

<b>Figura AII.4</b>	<b>Registros de epicentro lejano suelo (LS).....</b>	<b>61</b>
<b>Figura AII.5</b>	<b>Registros clasificables en tipo LR.....</b>	<b>62</b>
<b>Figura AII.6</b>	<b>Registros clasificables en tipo LS.....</b>	<b>62</b>
<b>Figura AIII.1a</b>	<b>Resistencia de colapso. Epicentro cercano, roca (CR), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\min}</math>.....</b>	<b>64</b>
<b>Figura AIII.1b</b>	<b>Resistencia de colapso. Epicentro lejano, roca (CR), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\min}</math>.....</b>	<b>64</b>
<b>Figura AIII.1c</b>	<b>Resistencia de colapso. Epicentro cercano, suelo (CS), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\min}</math>.....</b>	<b>65</b>
<b>Figura AIII.1d</b>	<b>Resistencia de colapso. Epicentro lejano, suelo (LS), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\min}</math>.....</b>	<b>65</b>
<b>Figura AIII.1e</b>	<b>Resistencia de colapso. Registros CEN000 y TAF021 (clasificables en tipo LR), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\min}</math>.....</b>	<b>66</b>
<b>Figura AIII.1f</b>	<b>Resistencia de colapso. Registros SCT090 y CDA000 (clasificables en tipo LS), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\min}</math>.....</b>	<b>66</b>
<b>Figura AIII.2a</b>	<b>Resistencia de colapso. Epicentro cercano, roca (CR), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{\min}</math>.....</b>	<b>67</b>
<b>Figura AIII.2b</b>	<b>Resistencia de colapso. Epicentro lejano, roca (LR), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{\min}</math>.....</b>	<b>67</b>
<b>Figura AIII.2c</b>	<b>Resistencia de colapso. Epicentro cercano, suelo (CS), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{\min}</math>.....</b>	<b>68</b>
<b>Figura AIII.2d</b>	<b>Resistencia de colapso. Epicentro lejano, suelo (LS), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{\min}</math>.....</b>	<b>68</b>
<b>Figura AIII.2e</b>	<b>Resistencia de colapso. Registros CEN000 y TAF021 (clasificables en tipo LR), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{\min}</math>.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura AIII.2f</b>	<b>Resistencia de colapso. Registros SCT090 y CDA000 (clasificables en tipo LS), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{\min}</math>.....</b>	<b>69</b>
<b>Figura AIII.3a</b>	<b>Resistencia de colapso. Epicentro cercano, roca (CR), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>70</b>
<b>Figura AIII.3b</b>	<b>Resistencia de colapso. Epicentro lejano, roca (LR), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>70</b>

<b>Figura AIII.3c</b>	<b>Resistencia de colapso. Epicentro cercano, suelo (CS), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura AIII.3d</b>	<b>Resistencia de colapso. Epicentro lejano, suelo (LS), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>71</b>
<b>Figura AIII.3e</b>	<b>Resistencia de colapso. Registros CEN000 y TAF021 (clasificables en tipo LR), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>72</b>
<b>Figura AIII.3f</b>	<b>Resistencia de colapso. Registros SCT090 y CDA000 (clasificables en tipo LS), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>72</b>
<b>Figura AIII.4a</b>	<b>Resistencia de colapso. Epicentro cercano, roca (CR), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>73</b>
<b>Figura AIII.4b</b>	<b>Resistencia de colapso. Epicentro lejano, roca (LR), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>73</b>
<b>Figura AIII.4c</b>	<b>Resistencia de colapso. Epicentro cercano, suelo (CS), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura AIII.4d</b>	<b>Resistencia de colapso. Epicentro lejano, suelo (LS), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>74</b>
<b>Figura AIII.4e</b>	<b>Resistencia de colapso. Registros CEN000 y TAF021 (clasificables en tipo LR), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>75</b>
<b>Figura AIII.4f</b>	<b>Resistencia de colapso. Registros SCT090 y CDA000 (clasificables en tipo LS), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>75</b>
<b>Figura AIV.1a</b>	<b>Trabajo monotónico de colapso. Terreno cercano, roca (CR), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\min}</math>.....</b>	<b>77</b>
<b>Figura AIV.1b</b>	<b>Trabajo monotónico de colapso. Terreno lejano, roca (LR), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\min}</math>.....</b>	<b>77</b>
<b>Figura AIV.1c</b>	<b>Trabajo monotónico de colapso. Terreno cercano, suelo (CS), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\min}</math>.....</b>	<b>78</b>
<b>Figura AIV.1d</b>	<b>Trabajo monotónico de colapso. Terreno lejano, suelo (LS), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\min}</math>.....</b>	<b>78</b>
<b>Figura AIV.1e</b>	<b>Espectros de trabajo monotónico de colapso (<math>W_c</math>). Registros CEN y TAF (clasificables en tipo LR), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\min}</math>.....</b>	<b>79</b>

<b>Figura AIV.1f</b>	<b>Espectros de trabajo monotónico de colapso (<math>Wc</math>). Registros SCT y CDA (clasificables en tipo LS), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{min}</math>.....</b>	<b>79</b>
<b>Figura AIV.2a</b>	<b>Trabajo monotónico de colapso. Terreno cercano, roca (CR), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{min}</math>.....</b>	<b>80</b>
<b>Figura AIV.2b</b>	<b>Trabajo monotónico de colapso. Terreno lejano, roca (LR), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{min}</math>.....</b>	<b>80</b>
<b>Figura AIV.2c</b>	<b>Trabajo monotónico de colapso. Terreno cercano, suelo (CS), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{min}</math>.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura AIV.2d</b>	<b>Trabajo monotónico de colapso. Terreno lejano, suelo (LS), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{min}</math>.....</b>	<b>81</b>
<b>Figura AIV.2e</b>	<b>Espectros de trabajo monotónico de colapso (<math>Wc</math>). Registros CEN y TAF (clasificables en tipo LR), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{min}</math>.....</b>	<b>82</b>
<b>Figura AIV.2f</b>	<b>Espectros de trabajo monotónico de colapso (<math>Wc</math>). Registros SCT y CDA (clasificables en tipo LS), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{min}</math>.....</b>	<b>82</b>
<b>Figura AIV.3a</b>	<b>Trabajo monotónico de colapso. Terreno cercano, roca (CR), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{max}</math>.....</b>	<b>83</b>
<b>Figura AIV.3b</b>	<b>Trabajo monotónico de colapso. Terreno lejano, roca (LR), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{max}</math>.....</b>	<b>83</b>
<b>Figura AIV.3c</b>	<b>Trabajo monotónico de colapso. Terreno cercano, suelo (CS), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{max}</math>.....</b>	<b>84</b>
<b>Figura AIV.3d</b>	<b>Trabajo monotónico de colapso. Terreno lejano, suelo (LS), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{max}</math>.....</b>	<b>84</b>
<b>Figura AIV.3e</b>	<b>Espectros de trabajo monotónico de colapso (<math>Wc</math>). Registros CEN y TAF (clasificables en tipo LR), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{max}</math>.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura AIV.3f</b>	<b>Espectros de trabajo monotónico de colapso (<math>Wc</math>). Registros SCT y CDA (clasificables en tipo LS), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{max}</math>.....</b>	<b>85</b>
<b>Figura AIV.4a</b>	<b>Trabajo monotónico de colapso. Terreno cercano, roca (CR), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{max}</math>.....</b>	<b>86</b>

<b>Figura AIV.4b</b>	<b>Trabajo monótonico de colapso. Terreno lejano, roca (LR), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{max}</math>.....</b>	<b>86</b>
<b>Figura AIV.4c</b>	<b>Trabajo monótonico de colapso. Terreno cercano, suelo (CS), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{max}</math>.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura AIV.4d</b>	<b>Trabajo monótonico de colapso. Terreno lejano, suelo (LS), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{max}</math>.....</b>	<b>87</b>
<b>Figura AIV.4e</b>	<b>Espectros de trabajo monótonico de colapso (<math>W_c</math>). Registros CEN y TAF (clasificables en tipo LR), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{max}</math>.....</b>	<b>88</b>
<b>Figura AIV.4f</b>	<b>Espectros de trabajo monótonico de colapso (<math>W_c</math>). Registros SCT y CDA (clasificables en tipo LS), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{max}</math>.....</b>	<b>88</b>
<b>Figura AV.1a</b>	<b>Energía total máxima de colapso. Terreno cercano, roca (CR), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{min}</math>.....</b>	<b>90</b>
<b>Figura AV.1b</b>	<b>Energía total máxima de colapso. Terreno lejano, roca (LR), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{min}</math>.....</b>	<b>90</b>
<b>Figura AV.1c</b>	<b>Energía total máxima de colapso. Terreno cercano, suelo (CS), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{min}</math>.....</b>	<b>91</b>
<b>Figura AV.1d</b>	<b>Energía total máxima de colapso. Terreno lejano, suelo (LS), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{min}</math>.....</b>	<b>91</b>
<b>Figura AV.1e</b>	<b>Espectros de energía total máxima de colapso. Registros CEN y TAF (clasificables en tipo LR), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{min}</math>.....</b>	<b>92</b>
<b>Figura AV.1f</b>	<b>Espectros de energía total máxima de colapso. Registros SCT y CDA (clasificables en tipo LS), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{min}</math>.....</b>	<b>92</b>
<b>Figura AV.2a</b>	<b>Energía total máxima de colapso. Terreno cercano, roca (CR), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{min}</math>.....</b>	<b>93</b>
<b>Figura AV.2b</b>	<b>Energía total máxima de colapso. Terreno lejano, roca (LR), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{min}</math>.....</b>	<b>93</b>
<b>Figura AV.2c</b>	<b>Energía total máxima de colapso. Terreno cercano, suelo (CS), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{min}</math>.....</b>	<b>94</b>
<b>Figura AV.2d</b>	<b>Energía total máxima de colapso. Terreno lejano, suelo (LS), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{min}</math>.....</b>	<b>94</b>

<b>Figura AV.2e</b>	<b>Espectros de energía total máxima de colapso. Registros CEN y TAF (clasificables en tipo LR), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{\min}</math>.....</b>	<b>95</b>
<b>Figura AV.2f</b>	<b>Espectros de energía total máxima de colapso. Registros SCT y CDA (clasificables en tipo LS), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{\min}</math>.....</b>	<b>95</b>
<b>Figura AV.3a</b>	<b>Energía total máxima de colapso. Terreno cercano, roca (CR), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>96</b>
<b>Figura AV.3b</b>	<b>Energía total máxima de colapso. Terreno lejano, roca (LR), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>96</b>
<b>Figura AV.3c</b>	<b>Energía total máxima de colapso. Terreno cercano, suelo (CS), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>97</b>
<b>Figura AV.3d</b>	<b>Energía total máxima de colapso. Terreno lejano, suelo (LS), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>97</b>
<b>Figura AV.3e</b>	<b>Espectros de energía total máxima de colapso. Registros CEN y TAF (clasificables en tipo LR), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>98</b>
<b>Figura AV.3f</b>	<b>Espectros de energía total máxima de colapso. Registros SCT y CDA (clasificables en tipo LS), <math>\zeta=0.02</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>98</b>
<b>Figura AV.4a</b>	<b>Energía total máxima de colapso. Terreno cercano, roca (CR), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>99</b>
<b>Figura AV.4b</b>	<b>Energía total máxima de colapso. Terreno lejano, roca (LR), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>99</b>
<b>Figura AV.4c</b>	<b>Energía total máxima de colapso. Terreno cercano, suelo (CS), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>100</b>
<b>Figura AV.4d</b>	<b>Energía total máxima de colapso. Terreno lejano, suelo (LS), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>100</b>
<b>Figura AV.4e</b>	<b>Espectros de energía total máxima de colapso. Registros CEN y TAF (clasificables en tipo LR), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>101</b>
<b>Figura AV.4f</b>	<b>Espectros de energía total máxima de colapso. Registros SCT y CDA (clasificables en tipo LS), <math>\zeta=0.05</math>, <math>\theta_{\max}</math>.....</b>	<b>101</b>

## LISTA DE TABLAS.

	Página.	
Tabla 2.1	Parámetros asociados a la formación del mecanismo en los marcos en estudio.....	18
Tabla 2.2	Trabajo Monotónico Máximo ( $W_m$ [ton/m]) para el primer ciclo de empujón estático.....	23
Tabla 2.3	Trabajo Monotónico Máximo ( $W_m$ [ton/m]) para el segundo ciclo de empujón estático.....	23
Tabla 2.4	Coefficientes de colapso para cada modelo en estudio.....	29
Tabla 2.5	Coefficientes de colapso normalizados al valor máximo de cada submodelo.....	26
Tabla 2.6	Coefficientes de colapso mínimos normalizados al valor máximo de cada submodelo.....	31
Tabla AI.1	Propiedades de los elementos del marco de referencia JAC05.....	49
Tabla AI.2	Momentos resistentes de los submodelos JAC05_1, JAC05_2, JAC05_3, JAC05_4.....	50
Tabla AI.3	Propiedades de los elementos del marco de referencia JAK05.....	51
Tabla AI.4	Momentos resistentes de los submodelos JAK05_1, JAK05_2, JAK05_3, JAK05_4.....	52
Tabla AI.5	Propiedades de los elementos del marco de referencia NAV03.....	53
Tabla AI.6	Momentos resistentes de los submodelos NAV03_1, NAV03_2, NAV03_3, NAV03_4.....	54
Tabla AI.7	Propiedades de los elementos del marco de referencia OBE04.....	55
Tabla AI.8	Momentos resistentes de los submodelos OBE04_1, OBE04_2, OBE04_3, OBE04_4.....	56

<b>Tabla AI.9</b>	<b>Propiedades de los elementos del marco de referencia OBE23.....</b>	<b>57</b>
<b>Tabla AI.10</b>	<b>Momentos resistentes de los submodelos OBE23_1, OBE23_2, OBE23_3, OBE23_4.....</b>	<b>58</b>
<b>Tabla AII.1</b>	<b>Parámetros asociados a los registros en estudio.....</b>	<b>59</b>

## NOMENCLATURA.

$C_c$	Coefficiente de colapso dinámico.
$C_u$	Cortante último en los Sistemas de un Grado de Libertad Trilineales (SUGLT) sin efecto P- $\Delta$ .
$C_y$	Coefficiente de fluencia de los Sistemas de un Grado de Libertad con Comportamiento Histerético Trilineal (SUGLT).
$\frac{C}{Q}$	Coefficiente de cortante basal de diseño sísmico.
$c$	Coefficiente de diseño sísmico.
$ct_1$	Cortante de fluencia asociado al desplazamiento de colapso de los Sistemas de un Grado de Libertad Trilineales.
$E$	Altura utilizada en la descripción de la forma del mecanismo plástico de una estructura $E=0$ denota que se trata de un mecanismo que comienza en la zona inferior de los elementos verticales de planta baja.
$E_a$	Energía de amortiguamiento disipada por los SUGLT.
$E_c$	Energía cinética disipada por los SUGLT.
$E_h$	Energía histerética disipada por los SUGLT.
$E_{tm}$	Energía total máxima disipada por los SUGLT.
$G$	Altura utilizada en la descripción de la forma del mecanismo plástico de una estructura $G=h$ denota que se trata de un mecanismo global.
$g$	Aceleración de la gravedad.
$h$	Altura total de la estructura.
$I_c$	Factor de escala de las aceleraciones de los registros utilizados a lo largo del estudio que induce inestabilidad dinámica.
$K_1$	Rigidez inicial de la curva cortante contra desplazamiento de los SUGLT sin el efecto P- $\Delta$ .
$K_2$	Rigidez del tramo de transición de la curva cortante contra desplazamiento de los SUGLT sin el efecto P- $\Delta$ .

$K_f$	Rigidez de la tercera rama de los SUGLT que toma en consideración el efecto P- $\Delta$ .
$K_G$	Rigidez geométrica de los SUGLT que toma en consideración el efecto P- $\Delta$ .
$K_i$	Rigidez inicial de los SUGLT con efecto P- $\Delta$ .
$m$	Masa unitaria de los SUGLT.
$Q$	Factor de comportamiento sísmico.
$T$	Periodo del modo fundamental de vibración de las estructuras estudiadas.
$T_0$	Periodo inicial del SUGLT afectado por P- $\Delta$ .
$V_{basal}$	Cortante basal de las estructuras estudiadas sin el efecto P- $\Delta$ .
$V_u$	Cortante basal último de las estructuras estudiadas sin el efecto P- $\Delta$ .
$V_y$	Cortante basal de fluencia de las estructuras estudiadas sin el efecto P- $\Delta$ .
$W_c$	Trabajo monotónico máximo de Sistemas de un Grado de Libertad Trilineales.
$W_m$	Trabajo monotónico máximo de estructuras.
$\alpha$	Factor de amplificación de desplazamiento máximo de azotea por efecto P- $\Delta$ de una estructura sometida análisis dinámicos.
$\Delta_u$	Desplazamiento de azotea último en las estructuras estudiadas sin efecto P- $\Delta$ .
$\Delta_y$	Desplazamiento de azotea de fluencia en las estructuras estudiadas sin efecto P- $\Delta$ .
$\delta$	Desplazamiento de azotea de una estructura.
$\delta_c$	Desplazamiento de colapso en los SUGLT.
$\delta_u$	Desplazamiento último, desplazamiento para el cual inicia la tercera rama en un SUGLT.
$\delta_y$	Desplazamiento de fluencia de los SUGLT.
$\mu_t$	Ductilidad del tramo de transición desarrollada por los SUGLT. En el caso de este estudio $\mu_t$ toma los valores de 1, 2, 3, 4, 5.
$\Omega_0$	Parámetro que toma en cuenta la geometría inicial de la estructura.
$\Omega_m$	Parámetro que toma en cuenta la geometría del mecanismo de falla.
$\Theta$	Coefficiente de estabilidad asociado a sistemas de múltiples grados de libertad.

$\theta$	Coeficiente de estabilidad de los SUGLT.
$\theta_0$	Coeficiente de estabilidad en estructuras asociado con la forma elástica inicial.
$\theta_m$	Coeficiente de estabilidad asociado con la forma del mecanismo plástico de la estructura.
$\theta_{max}$	Coeficiente de estabilidad máximo en los análisis de SUGLT.
$\theta_{min}$	Coeficiente de estabilidad mínimo en los análisis de SUGLT.
$\tau$	Cociente entre la carga total gravitacional y la carga muerta en una estructura.
$\omega_0$	Frecuencia natural cíclica del primer modo de vibrar de una estructura.
$\xi$	Porcentaje del amortiguamiento crítico.

# CAPÍTULO 1. INTRODUCCIÓN.

## 1.1 Alcance del trabajo.

Durante el desarrollo del presente trabajo se hacen las consideraciones que se mencionan a continuación.

- En el análisis de estructuras (marcos planos) se considera que la inestabilidad dinámica o el colapso dinámico se presenta cuando el desplazamiento máximo de azotea en un análisis considerando efecto  $P-\Delta$  es cuatro veces tal desplazamiento sin considerar el efecto de la carga gravitacional.
- En el análisis de sistemas de un grado de libertad con ciclo histerético trilineal (SUGLT) se considera que la inestabilidad dinámica se alcanza, cuando durante su respuesta dinámica se alcanza cierto nivel de desplazamiento (desplazamiento de colapso) definido en la sección 3.2.1.
- El factor de seguridad por inestabilidad dinámica o colapso dinámico resulta ser el valor por el cual se escalan las aceleraciones de un registro para que induzca comportamiento inestable en un sistema (estructural o de un grado de libertad) en un análisis dinámico.
- Se considera un endurecimiento por deformación del acero del 0.0% del módulo de elasticidad en los análisis dinámicos de las estructuras en estudio.
- En los análisis dinámicos de estructuras, la reducción del coeficiente de cortante basal de diseño sísmico (reducción de la resistencia de las estructuras), se hace sólo de manera aproximada escalando las aceleraciones del registro acelerográfico en cuestión.
- Se considera que los elementos de cada estructura cuentan con capacidad suficiente (por ejemplo capacidad de rotación) para lograr la formación del mecanismo plástico, es decir, el único estado límite revisado en el presente trabajo es el colapso dinámico o inestabilidad dinámica.

## 1.2 Antecedentes.

La Inestabilidad Dinámica es un fenómeno en el cual un sistema estructural desarrolla desplazamientos crecientes irreversibles durante su respuesta dinámica plástica debidos a la presencia de fuerzas gravitacionales. Tal fenómeno está relacionado con el estado límite de resistencia última de sistemas sujetos a movimientos fuertes de terreno.

Las siguientes figuras tratan de explicar cualitativamente el fenómeno de la inestabilidad dinámica. En las gráficas se muestra la respuesta de un sistema de un grado de libertad con ciclo histérico trilineal (SUGLT) el cual es utilizado para tratar de representar más cercanamente el comportamiento de una estructura sometida a un procedimiento de empujón estático, dicho sistema cuenta con las características mostradas más abajo y es sometido a un análisis dinámico utilizando el registro acelerométrico TAF021, el cual corresponde al evento sísmico de California de 1952 registrado en la estación de Kern County. Los valores asignados a los parámetros utilizados sólo tienen por fin ejemplificar el fenómeno de la inestabilidad dinámica.

$C_y = 0.5$	Cortante de fluencia del SUGLT.
$\theta = 0.04762$	Coefficiente de estabilidad del sistema.
$\xi = 5\%$	Porcentaje del amortiguamiento crítico.
$\mu_t = 1.4$	Ductilidad del tramo de transición.
$T_0 = 1.0$	Periodo del sistema afectado por P- $\Delta$ .
$m=1.0$	Masa unitaria asociada al SUGLT.

$$\theta = \frac{K_f}{K_i}$$

**Ecuación 1.1**

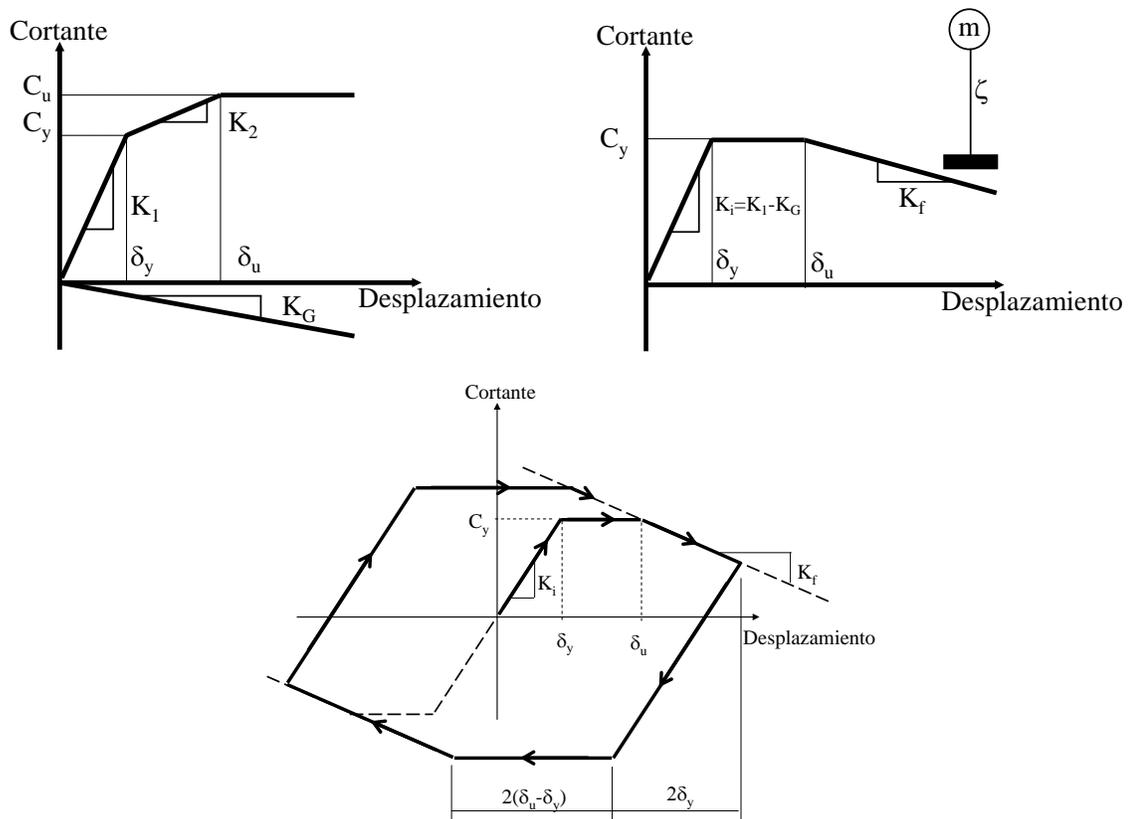
donde  $K_i$  es la rigidez inicial del SUGLT con efectos P- $\Delta$  y  $K_f$  es la rigidez de la tercera rama del sistema que considera el efecto de la carga gravitacional actuante. El coeficiente de estabilidad entonces es una medida cuantitativa del efecto de la carga gravitacional (pendiente negativa) en la rigidez del SUGLT.

$$\mu_t = \frac{\delta_u}{\delta_y}$$

Ecuación 1.2

donde  $\delta_y$  es el desplazamiento de fluencia,  $\delta_u$  es el desplazamiento último.

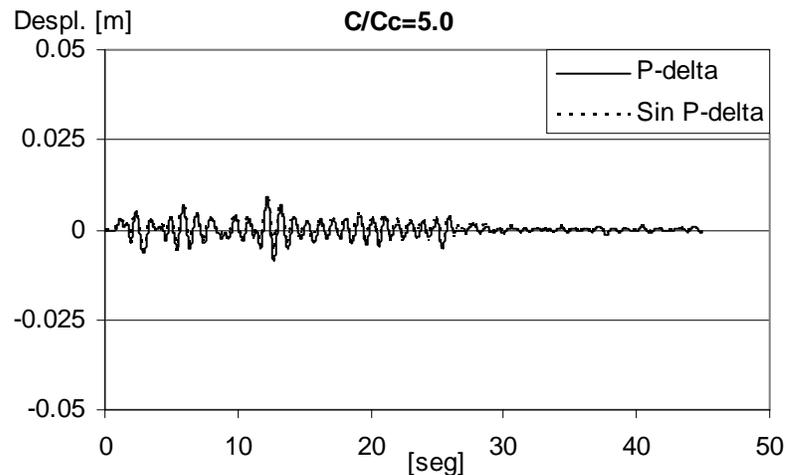
En la figura 1.1 se muestra la curva cortante vs. desplazamiento para un Sistema de un Grado de Libertad Trilineal. En la figura se muestra gráficamente el significado de cada parámetro utilizado en el análisis dinámico del SUGLT así como la forma en que se obtiene éste último, aquí  $K_2 = |K_G|$  de ahí que al hacer la suma algebraica de las rigideces resulte una segunda rama con pendiente igual a cero. Asimismo se muestra el comportamiento del SUGLT cuando es sometido a ciclo histerético.



**Figura 1.1** Parámetros asociados a un Sistema de un Grado de Libertad Trilineal sometido al registro acelerométrico TAF021.

El cortante de fluencia (llamado también coeficiente de fluencia  $C_y$ ) mínimo para el cual el sistema alcanza desplazamientos irreversibles por efecto de la carga gravitacional cuando es sometido a un registro acelerométrico se denomina coeficiente de colapso ( $C_c$ ), el efecto que la carga gravitacional tendría en una estructura (efectos P- $\Delta$ ) es representado por la pendiente negativa en los SUGLT, entonces, si se deseara desprestigiar el efecto P- $\Delta$  en el análisis de SUGLT bastaría con definir al sistema con una pendiente igual a cero en la tercera rama de su curva cortante desplazamiento.

Para explicar de manera gráfica el fenómeno de la inestabilidad dinámica se muestra la respuesta del SUGLT para diferentes coeficientes de fluencia con y sin efectos P- $\Delta$ .

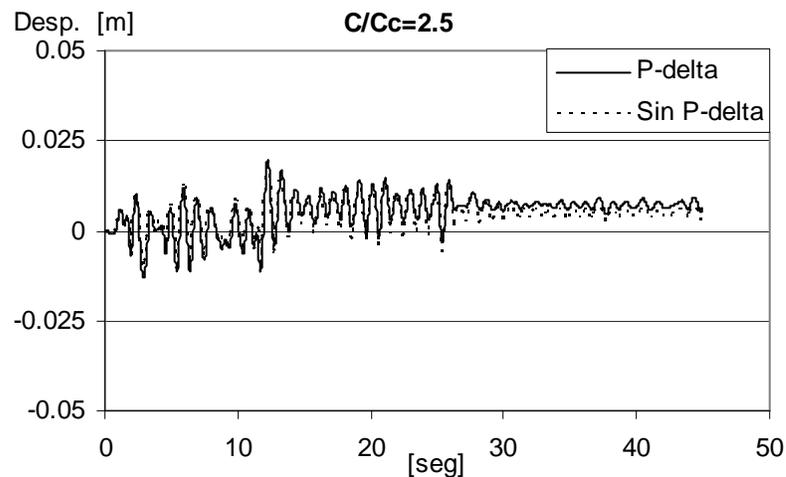


**Figura 1.2** Respuesta dinámica de un Sistema de un Grado de Libertad con coeficiente de fluencia cinco veces mayor que el coeficiente de colapso con y sin efectos de la carga gravitacional.

En la figura 1.2 se puede observar que para coeficientes de fluencia cinco veces mayores del coeficiente de colapso la respuesta del sistema no presenta diferencias significativas al considerar o no los efectos de la carga gravitacional. Inclusive las curvas de las respuestas del SUGLT con y sin considerar los efectos P- $\Delta$  prácticamente se superponen. Este último hecho confirma la correlación existente entre el fenómeno de la inestabilidad dinámica y la resistencia última de sistemas sometidos a movimientos severos de terreno, pues este fenómeno no se presenta cuando la estructura es sometida a niveles de demanda de

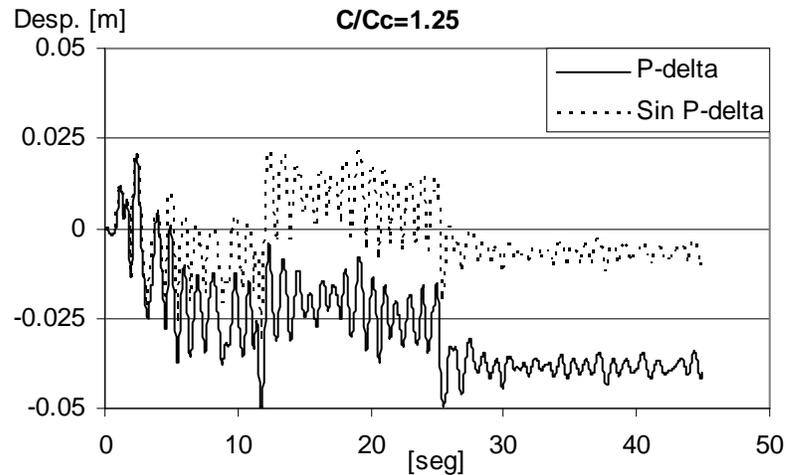
resistencia de fuerzas sísmicas menores que la capacidad última de ésta para resistir tales sollicitaciones, en este caso el sistema no incursiona de manera importante en su intervalo de comportamiento plástico.

Conforme el coeficiente de fluencia se va reduciendo, la respuesta del sistema tiende a presentar pequeñas amplificaciones de desplazamiento debidas al efecto P- $\Delta$ , como se muestra en la figura 1.3. Para el caso mostrado, los desplazamientos tienden a incrementarse con respecto a la figura 1.2 pero el efecto de la carga gravitacional parece no ser determinante en el comportamiento del sistema.

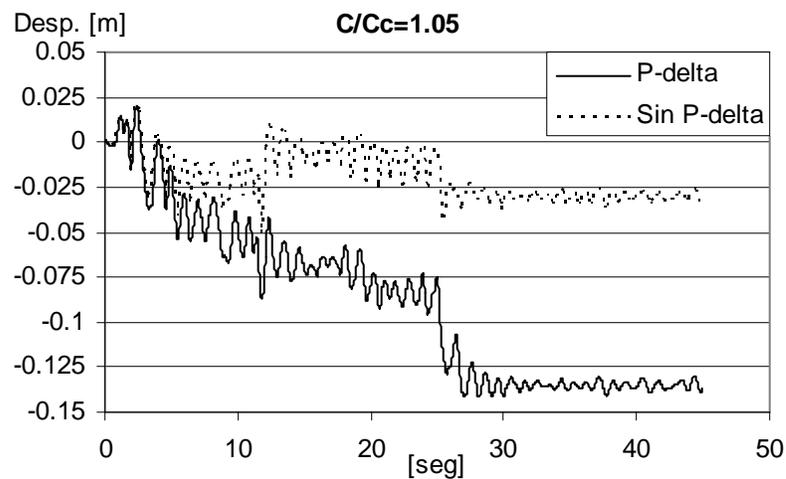


**Figura 1.3** Respuesta dinámica de un Sistema de un Grado de Libertad con coeficiente de fluencia dos y media veces mayor que el cortante de colapso con y sin efectos de la carga gravitacional.

Las figuras 1.4 y 1.5 muestran la respuesta del sistema cuando su coeficiente de fluencia se ha reducido de tal forma que es muy cercano al coeficiente de colapso, aquí es evidente el efecto desestabilizador de la carga gravitacional sobre el sistema, los desplazamientos observados de las curvas de respuesta con P- $\Delta$  tienden a triplicar los desplazamientos no afectados por este efecto.



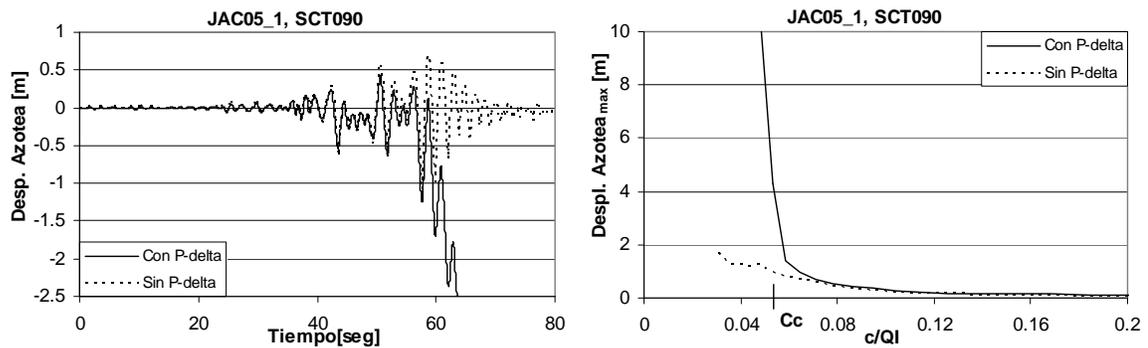
**Figura 1.4** Respuesta dinámica de un Sistema de un Grado de Libertad con coeficiente de fluencia 25% mayor que el coeficiente de colapso con y sin efectos de la carga gravitacional.



**Figura 1.5** Respuesta dinámica de un Sistema de un Grado de Libertad con coeficiente de fluencia 5% mayor que el coeficiente de colapso con y sin efectos de la carga gravitacional.

Cuando el coeficiente de fluencia es igual al coeficiente de colapso los desplazamientos del sistema afectado por la carga gravitacional crecen de manera irreversible y asintótica durante su respuesta dinámica, induciendo en el sistema comportamiento plástico importante y colapso por inestabilidad dinámica.

El fenómeno antes descrito también se observa en sistemas de múltiples grados de libertad (sistemas estructurales). En el umbral de la inestabilidad dinámica, el sistema experimenta incrementos de desplazamiento importantes durante su respuesta dinámica, no así para sistemas estructurales sin efectos P- $\Delta$ . La figura 1.6 muestra la respuesta dinámica inestable de un sistema estructural (submodelo JAC05\_1, descrito más adelante y en el anexo I) bajo la acción de un registro sísmico (SCT090, registro clasificado en la sección 2.5.1 y en el anexo II), con y sin considerar los efectos P- $\Delta$ . Dicha estructura experimenta desplazamientos crecientes irreversibles por efecto de la carga gravitacional, cuando la resistencia de ésta se ha reducido de tal forma que es forzada a incursionar de manera importante en su intervalo de comportamiento inelástico durante su respuesta dinámica.



**Figura 1.6** Respuesta dinámica inestable y curva Desplazamiento máximo de azotea vs. Coeficiente basal de diseño para una marco plano con y sin carga gravitacional.

En la figura 1.6, a la derecha se muestra una curva desplazamiento máximo de azotea contra coeficiente basal de diseño donde se observa que se puede definir una resistencia basal de diseño mínima que prevenga este fenómeno. En esta última curva se muestra para cada coeficiente basal de diseño el desplazamiento máximo que experimenta la estructura, es decir, para un coeficiente de cortante basal de diseño de 0.2 se hace el análisis dinámico de la estructura y se obtiene el desplazamiento máximo. El siguiente punto de la curva se obtiene reduciendo el coeficiente de cortante basal de diseño y obteniendo nuevamente el desplazamiento máximo. En forma aproximada este coeficiente se reduce escalando las aceleraciones del registro utilizado, esto se discute con más detalle en la sección 2.5.2, el proceso se repite hasta obtener la curva mencionada.

Aunque prevenir el colapso es uno de los objetivos principales del diseño sísmico, existe incertidumbre en los procedimientos actuales para proporcionar un margen de seguridad adecuado contra la inestabilidad dinámica. El efecto desestabilizador de las cargas gravitacionales en edificios sujetos a movimientos severos del terreno puede llevar a la estructura al colapso (inestabilidad dinámica) cuando ésta es forzada a desarrollar incursiones inelásticas importantes durante la respuesta, como se ilustró en las figuras anteriores. Estudios realizados sobre la inestabilidad dinámica de estructuras de varios niveles han señalado el papel crítico que el mecanismo de colapso juega en la seguridad de la estructura contra el colapso (Nakajima *et al.*, 1990, Bernal, 1992, Sordo y Bernal, 1993, Bernal, 1998). Estos estudios han reportado que diseños sísmicos comunes no aseguran necesariamente un nivel adecuado de seguridad contra la inestabilidad, dependiendo dicho nivel fundamentalmente de la sobrerresistencia y del mecanismo de falla que ocurre. Dichos estudios se han enfocado a la caracterización del problema a partir de las propiedades elásticas, la resistencia última y la forma del mecanismo de colapso.

En particular, Bernal (1992) ha propuesto una metodología simple para estructuras planas basada en la reducción de la estructura a un sistema de un grado de libertad equivalente, obtenido a través de un procedimiento de empujón predefinido. Por su parte y dado que la geometría tridimensional de la mayoría de los edificios reales introduce la posibilidad de desarrollar mecanismos de falla rotacionales (Sordo y Bernal, 1994 y 1996) y que el efecto de bidireccionalidad de los movimientos del terreno y el ángulo de incidencia de éste sobre la estructura agrega complejidad al problema, se ha propuesto recientemente (Sordo y Bernal, 1994, Sordo y Félix, 2000) un enfoque atractivo para simplificar el problema a través de la definición de un sistema de un grado de libertad con propiedades de disipación de energía equivalentes a aquellos de la estructura tridimensional.

En los casos indicados en el párrafo precedente los sistemas de un grado de libertad equivalentes se formulan a través de las propiedades elásticas de la estructura, la resistencia última de la misma (en términos energéticos o de fuerza cortante) y la forma del mecanismo de colapso. Sin embargo, no se han hecho a la fecha estudios detallados sobre

las variaciones que las estimaciones de la seguridad contra inestabilidad dinámica puedan presentar debido a las características mismas del proceso de formación del mecanismo.

En este trabajo se pretende ofrecer un primer paso en esta dirección, estimando las variaciones en el factor de seguridad contra inestabilidad dinámica que se pueden presentar debido a las características del proceso de formación del mecanismo plástico dado que las características elásticas, el cortante resistente último y la forma del mecanismo se mantienen constantes.

En la primera parte del trabajo se estudia el comportamiento de un conjunto de marcos planos con los que se ilustran las importantes diferencias que se pueden llegar a presentar en el factor de seguridad por inestabilidad dinámica (Sordo y Díaz, 2003, Díaz y Sordo, 2004). Tales marcos se someten a un amplio grupo de registros acelerográficos para determinar la influencia de las características de los mismos. Con este análisis se determinan tendencias cualitativas relacionadas con las diferentes geometrías estructurales propuestas, sus diferentes mecanismos y las características propias de los registros acelerográficos. En la segunda parte se analizan Sistemas de un Grado de Libertad Trilineales (SUGLT) para evaluar ampliamente los parámetros que pueden resultar importantes para caracterizar el efecto de la transición elastoplástica en el comportamiento de estructuras en el umbral de la inestabilidad dinámica.

### **1.3 Objetivos**

El objetivo principal del presente trabajo consiste en averiguar si el proceso de formación del mecanismo de falla en estructuras sometidas a movimientos fuertes de terreno es un parámetro importante en la evaluación del nivel de seguridad contra colapso dinámico.

Adicionalmente se plantean los siguientes objetivos secundarios relacionados.

- Determinar si los parámetros asociados a los registros acelerográficos son relevantes en el efecto que el proceso de formación del mecanismo de falla tiene sobre el fenómeno de la inestabilidad dinámica.
- Estudiar en detalle el proceso de formación del mecanismo plástico en ciclos posteriores al primero, en particular el trabajo realizado en el segundo ciclo de empujón estático, para determinar si dicho trabajo es un parámetro influyente en el factor de seguridad por inestabilidad dinámica.
- Verificar si las tendencias observadas en sistemas de varios grados de libertad son similares a las encontradas en sistemas de un grado de libertad con comportamiento histerético trilineal, en caso contrario, determinar las causas de las posibles diferencias que se encuentrasen.

#### **1.4 Cuerpo del Trabajo.**

El capítulo dos describe de manera detallada la metodología utilizada en el caso de estudio de marcos planos, la obtención de los submodelos utilizados para cada marco de referencia, la obtención de las curvas cortante basal-desplazamiento de azotea para el primer y segundo ciclo de un procedimiento de empujón estático histerético para cada submodelo en estudio. Asimismo se muestran las curvas comparativas de primer y segundo ciclo de empujón estático. Se cuantifica el trabajo efectuado para desplazar la estructura hasta su condición de equilibrio inestable para el primer y segundo ciclos de empujón estático histerético. Se establece el estado límite de inestabilidad dinámica a utilizarse durante el trabajo y se define el coeficiente de colapso dinámico ( $C_c$ ). En este capítulo se estudia el comportamiento dinámico de los marcos de referencia utilizados en el presente trabajo, se someten los marcos a la acción de grupos de sismos seleccionados (veinte registros en total), obteniéndose tablas comparativas del  $C_c$  para amplificaciones de desplazamiento máximo de azotea de cuatro veces con respecto al desplazamiento máximo de azotea sin efectos P- $\Delta$ . Finalmente, se discuten las diferencias que se presentan en el coeficiente de colapso para un mismo marco de referencia. Se elaboran conclusiones previas de los resultados obtenidos en el caso de marcos planos.

En el capítulo tres se analizan Sistemas de un Grado de Libertad Trilineales (SUGLT) con el objeto de detectar tendencias generales que puedan representar el comportamiento de estructuras de múltiples grados de libertad sometidas a excitaciones sísmicas importantes. Así, se calculan los espectros del coeficiente de colapso ( $C_c$ ) asociado a cada SUGLT y a cada registro utilizado. Se presentan tablas comparativas para SUGLT que compartan el periodo inicial, el porcentaje de amortiguamiento crítico y el coeficiente de estabilidad, pero diferentes ramas de transición elasto-plástica. Se estudian y analizan adicionalmente espectros energéticos asociados a la condición de colapso incipiente.

En el último capítulo de este trabajo se analizan los resultados de los dos casos de estudio presentados, marcos planos y SUGLT para generar una serie de conclusiones acerca de los resultados obtenidos en ambos casos. Se explica en qué casos la transición de los estados elástico al plástico tiene influencia en estructuras que se someten a movimientos de terreno fuertes en el umbral de la inestabilidad dinámica y se proponen sugerencias para investigaciones posteriores.

En los anexos al trabajo se presentan los acelerogramas y parámetros asociados a los registros utilizados en el trabajo, las características de las estructuras utilizadas y diversos espectros de resistencia de colapso, trabajo monotónico máximo y energía total máxima disipada por el sistema que por su cantidad no se consideró adecuado incorporarlos al cuerpo principal de la Tesis.

## CAPÍTULO 2. MARCOS PLANOS.

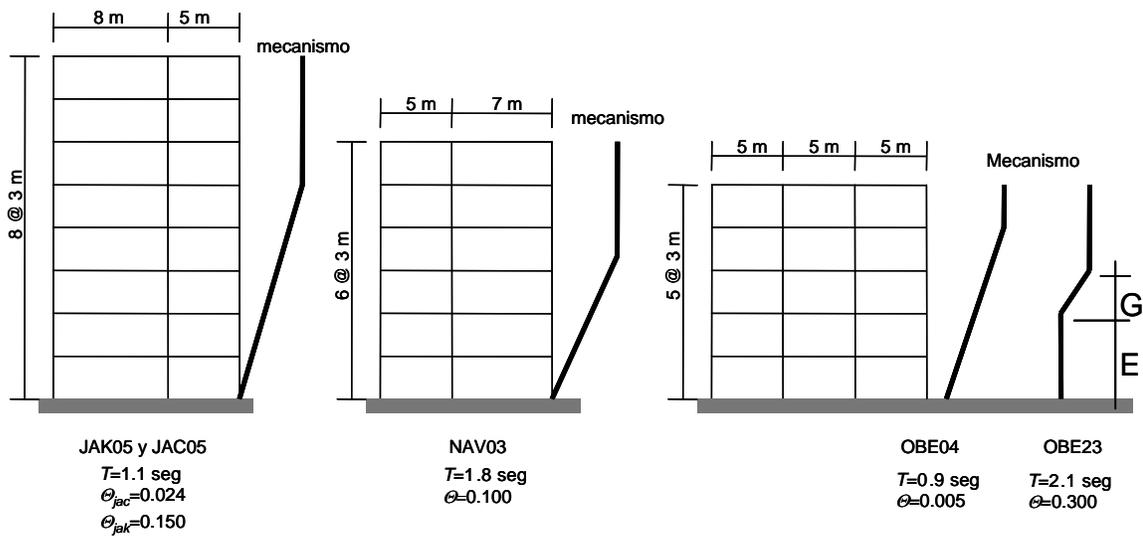
Como primer paso dentro de la presente investigación se estudia en detalle la influencia que las características de la transición del estado elástico al estado plástico en estructuras de acero bidimensionales pueden llegar a tener en el factor de seguridad contra inestabilidad dinámica. Las estructuras estudiadas corresponden a prediseños efectuados por estudiantes de licenciatura de acuerdo a reglamentaciones vigentes y sometidas a movimientos fuertes de terreno. Para cada estructura (marco de referencia) se definen submodelos que conservan sus características elásticas como la rigidez inicial y el periodo, el mecanismo plástico de colapso y el cortante basal último ante un proceso de empujón estático con un patrón de cargas laterales proporcional a las masas; siendo la única diferencia la transición del estado elástico a la formación del mecanismo de falla.

### 2.1 Marcos de Referencia.

Para la realización del presente estudio se consideran cinco marcos planos de acero prediseñados de acuerdo a la reglamentación del Distrito Federal de 1987, tales estructuras se supusieron desplantadas en la zona del lago (Zona III) y con uso de oficinas, correspondiéndoles un coeficiente de diseño sísmico  $c$  igual a 0.4 y les fue asignado un factor de comportamiento sísmico  $Q$  de 2.0, de los valores anteriores se consideró una relación entre el cortante basal resistente último y el peso total de la estructura de 0.2 ( $c/Q$  coeficiente de cortante basal de diseño). Para los análisis dinámicos se considera un amortiguamiento del 2% del crítico y un comportamiento elastoplástico perfecto. En su caso se consideran los efectos P- $\Delta$  con la formulación de la matriz de rigidez geométrica.

La geometría de los marcos de referencia junto con un esquema de su mecanismo de colapso (obtenido de un análisis de empujón estático con un patrón de fuerzas proporcionales a las masas de cada entrepiso, del prediseño original de cada marco de referencia) y el periodo del primer modo de vibración ( $T$ ) se muestra en la figura 2.1.

Asimismo se muestra en la figura 2.1 el valor del coeficiente de estabilidad asociado a cada uno de los modelos ( $\Theta$ ). Para el caso de estructuras bidimensionales y conociendo de antemano el mecanismo de falla que ocurre, este coeficiente se calcula de acuerdo a las siguientes expresiones (Bernal, 1992).



**Figura 2.1** Vista en elevación de los marcos de acero objeto del estudio.

$$\Theta = \frac{\theta_m}{Q_0}$$

**Ecuación 2.1**

donde

$$\theta_m = \frac{\tau g \Omega_m}{\omega_0^2 h}$$

**Ecuación 2.2**

donde

$\tau$  Razón de la carga total gravitacional a la carga muerta.

$g$  Aceleración de la gravedad.

$\omega_0$  Frecuencia natural cíclica del primer modo.

$h$  Altura total de la estructura.

$$\Omega_m = \frac{\left(1 - \frac{G}{2h} - \frac{E}{h}\right)}{\frac{G}{h} \left(1 - \frac{2G}{3h} - \frac{E}{h}\right)} \quad \text{Ecuación 2.3}$$

$G$  y  $E$  están en función de la forma del mecanismo plástico y se definen en la figura 2.1.

$$Q_0 = 1 - \theta_0 + \theta_m \quad \text{Ecuación 2.4}$$

donde

$$\theta_0 = \frac{\tau g \Omega_0}{\omega_0^2 h} \quad \text{Ecuación 2.5}$$

$$\Omega_0 = \frac{3n}{2n+1} \quad \text{Ecuación 2.6}$$

en la ecuación 2.6  $n$  es el número de niveles de la estructura.

El coeficiente de estabilidad es una medida cuantitativa del efecto desestabilizante de las cargas gravitacionales actuando sobre el mecanismo plástico, este coeficiente toma valores entre cero y uno. Por ejemplo.

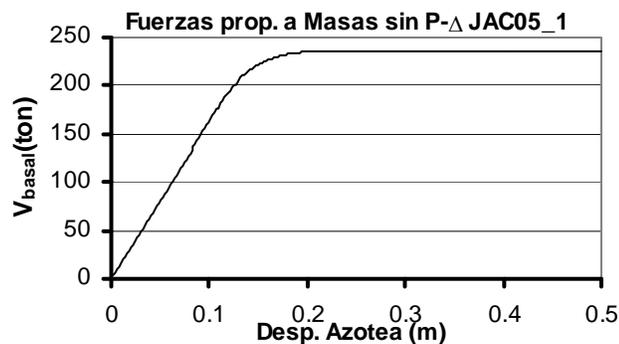
$\theta = 0$             Implica que no existen efectos P- $\Delta$  actuando en la estructura.

$\theta = 1.0$           Implica inestabilidad estática en la estructura.

De la figura 2.1 podemos observar que los marcos de referencia JAC05 y JAK05 poseen la misma geometría y forma de mecanismo de falla. En realidad el diseño es el mismo para ambos casos, siendo la única diferencia el nivel de carga gravitacional que actúa en las columnas de cada marco; para el marco de referencia JAK05 la carga gravitacional transmitida a las columnas por sistemas perpendiculares a éste es cuatro veces mayor que en el caso del marco de referencia JAC05. Por otro lado, en el caso de los marcos de referencia OBE04 y OBE23, estos comparten únicamente la geometría general puesto que el diseño de ambos es diferente y como se puede ver en la figura 2.1, la forma del mecanismo de falla de ambos marcos también es distinta.

## 2.2 Obtención de los submodelos para cada Marco de Referencia.

Cada marco de referencia diseñado se somete a un procedimiento de empujón estático con carga proporcional a las masas de cada entrepiso (con ayuda del programa de análisis estructural DRAIN 2DX, (V. Prakash *et al.*, 1993)) y se obtiene la curva cortante basal contra desplazamiento de azotea como se muestra en la figura 2.2.

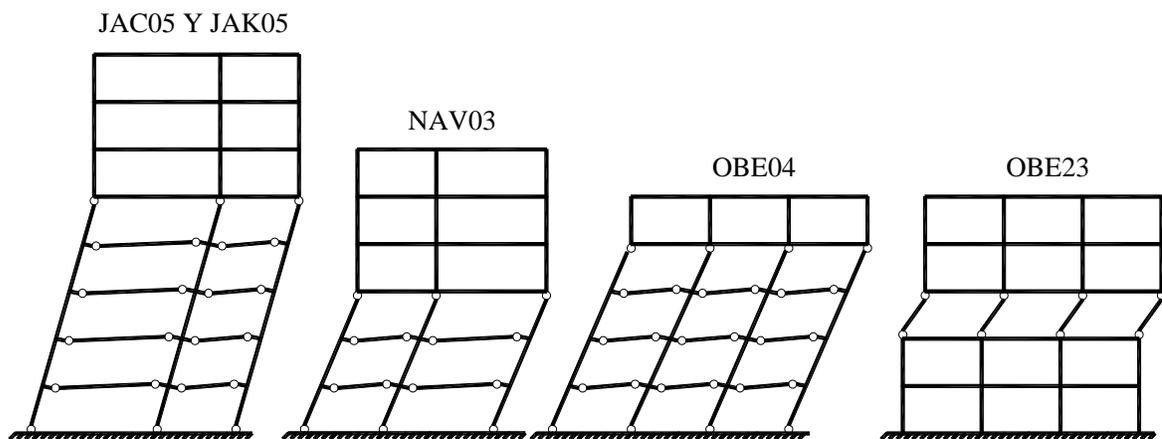


**Figura 2.2** Cortante Basal Último vs. Desplazamiento de Azotea para JAC05\_1.

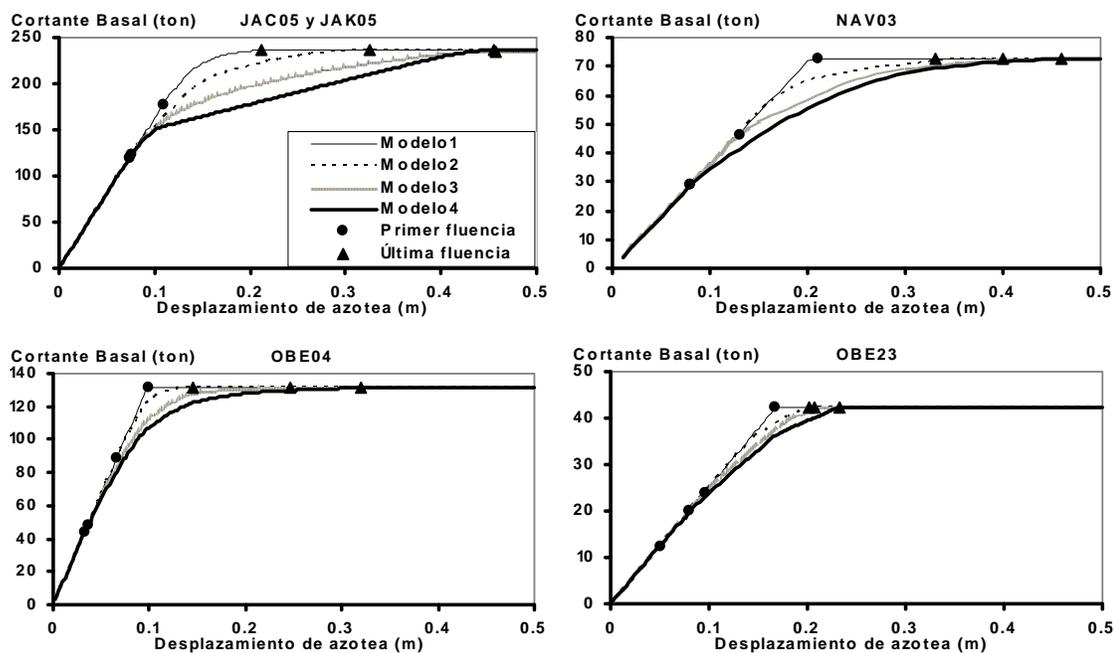
De los resultados arrojados por el programa computacional se determina como se formaliza el mecanismo de falla generado para cada marco de referencia. Por ejemplo, en la figura 2.3 podemos ver el mecanismo plástico asociado a los diferentes marcos de referencia. Los círculos de la figura indican las articulaciones plásticas que aparecen en la estructura y que definen el mecanismo de falla que ocurre.

A partir de cada marco de referencia se generan cuatro submodelos para los que se induce un mecanismo específico con diferentes secuencias de formación de articulaciones plásticas. Esto se consigue modificando resistencias de elementos específicos, es decir, a las secciones que no intervienen en el mecanismo plástico se les asignan resistencias muy grandes para garantizar que el mecanismo no variará de submodelo a submodelo y a los elementos que se articulan para formar el mecanismo se les varía su resistencia de tal forma que el orden en que aparecen las articulaciones es aleatorio y distinto entre los diferentes submodelos, esto último sin variar la capacidad de cortante basal último de la estructura. Así se obtienen los diferentes submodelos que van desde aquel que presenta una pérdida de

rigidez repentina (modelos aproximadamente bilineales con ductilidades y sobrerresistencias cercanas a 1.0), hasta aquellos que presentan una transición paulatina entre el estado elástico y la formación del mecanismo plástico. Las características de los elementos que conforman cada estructura se muestran en detalle en el Anexo I.

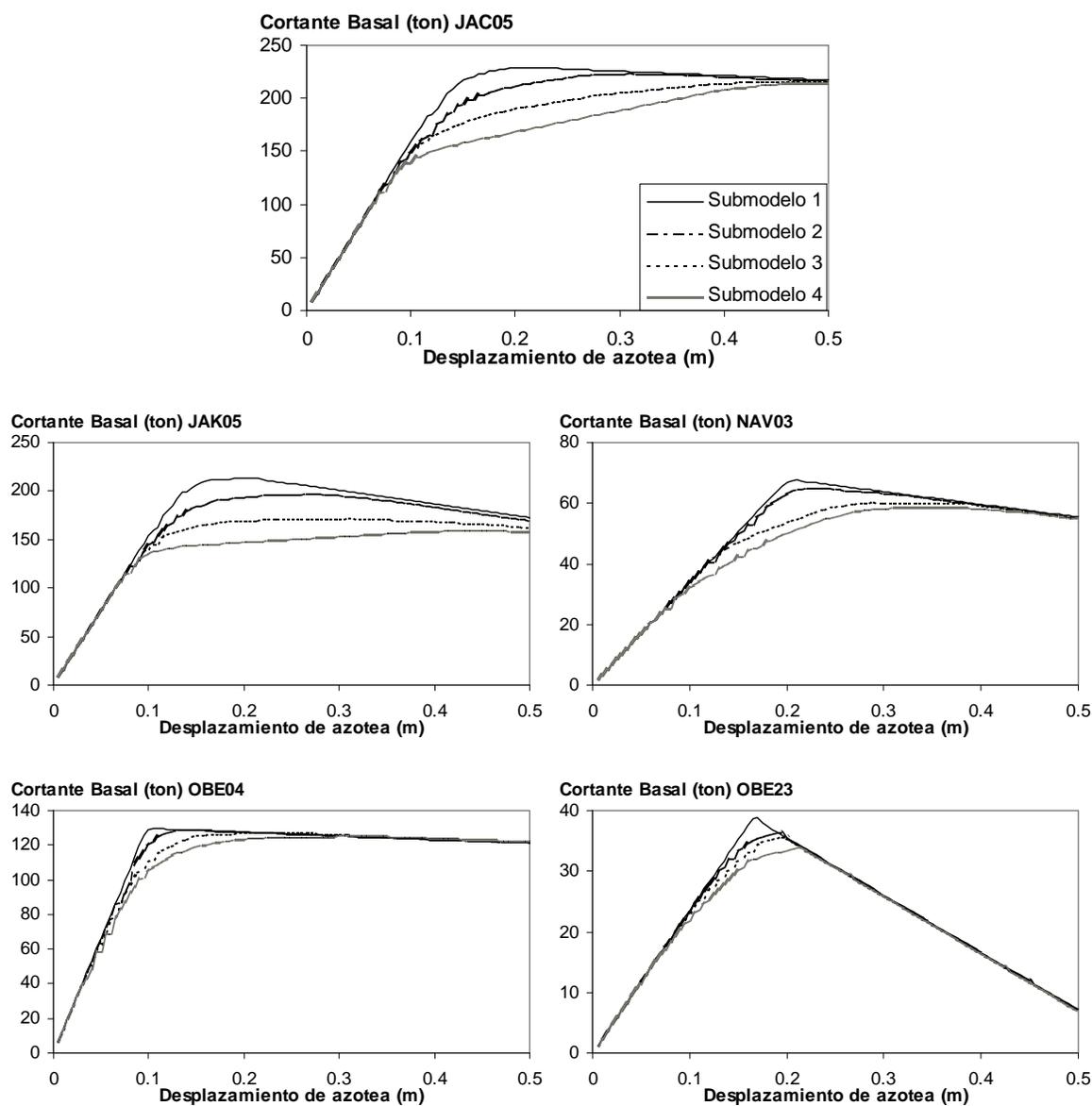


**Figura 2.3** Mecanismo Plástico de los Marcos de Referencia.



**Figura 2.4** Cortante Basal vs Desplazamiento de Azotea para los Marcos de Referencia sin efecto P-Δ.

Para comparar, se aplican empujones con patrones de carga incremental proporcional a las masas hasta la formación del mecanismo, observándose las diferencias que se muestran en la figura 2.4 sin considerar efectos  $P-\Delta$  y en la figura 2.5 considerando efectos  $P-\Delta$ . Estas diferencias entre los submodelos de un mismo marco de referencia son las que se estudian en el presente trabajo para determinar si influyen en el factor de seguridad contra inestabilidad dinámica.



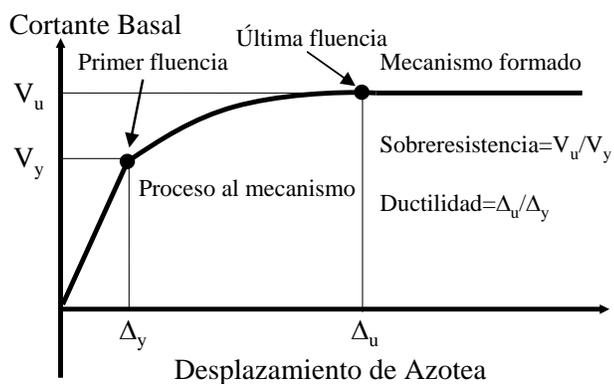
**Figura 2.5** Curvas Cortante Basal vs Desplazamiento de Azotea para los Marcos de Referencia con efecto  $P-\Delta$ .

En las figuras 2.4 y 2.5 se puede observar la influencia negativa que sobre la estabilidad de la estructura tiene el efecto P- $\Delta$  cuando se genera un mecanismo local o de entrepiso suave, en particular, las curvas del marco de referencia OBE23 muestran una pérdida drástica de la rigidez de la estructura precisamente por la generación de un mecanismo local.

La tabla 2.1 muestra parámetros asociados a la transición al mecanismo plástico para los submodelos en estudio.

**Tabla 2.1** Parámetros asociados a la formación del mecanismo en los marcos en estudio.

Marco de referencia	Submodelo	Cortante de fluencia $V_y$ (ton)	Desplazamiento de fluencia $\Delta_y$ (m)	Cortante último $V_u$ (ton)	Desplazamiento último $\Delta_u$ (m)	Sobrerresistencia ( $V_u/V_y$ )	Ductilidad ( $\Delta_u/\Delta_y$ )
JAC05	1	176.230	0.110	236.440	0.212	1.342	1.927
	2	119.600	0.074	236.440	0.326	1.977	4.405
	3	118.600	0.074	236.440	0.458	1.994	6.189
	4	122.310	0.076	236.440	0.456	1.933	6.000
JAK05	1	169.750	0.106	236.440	0.222	1.393	2.094
	2	120.710	0.076	236.440	0.336	1.959	4.421
	3	120.710	0.076	236.440	0.470	1.959	6.184
	4	112.240	0.070	236.440	0.484	2.107	6.914
NAV03	1	72.630	0.210	72.630	0.210	1.000	1.000
	2	28.780	0.080	72.630	0.330	2.524	4.125
	3	46.390	0.130	72.630	0.400	1.566	3.077
	4	28.700	0.080	72.630	0.460	2.531	5.750
OBE04	1	131.340	0.100	131.340	0.100	1.000	1.000
	2	88.260	0.066	131.400	0.146	1.489	2.212
	3	48.400	0.036	131.410	0.246	2.715	6.833
	4	43.470	0.034	131.410	0.320	3.023	9.412
OBE23	1	42.204	0.168	42.204	0.168	1.000	1.000
	2	23.772	0.096	42.204	0.204	1.775	2.125
	3	19.975	0.080	42.204	0.208	2.113	2.600
	4	12.382	0.050	42.204	0.232	3.408	4.640



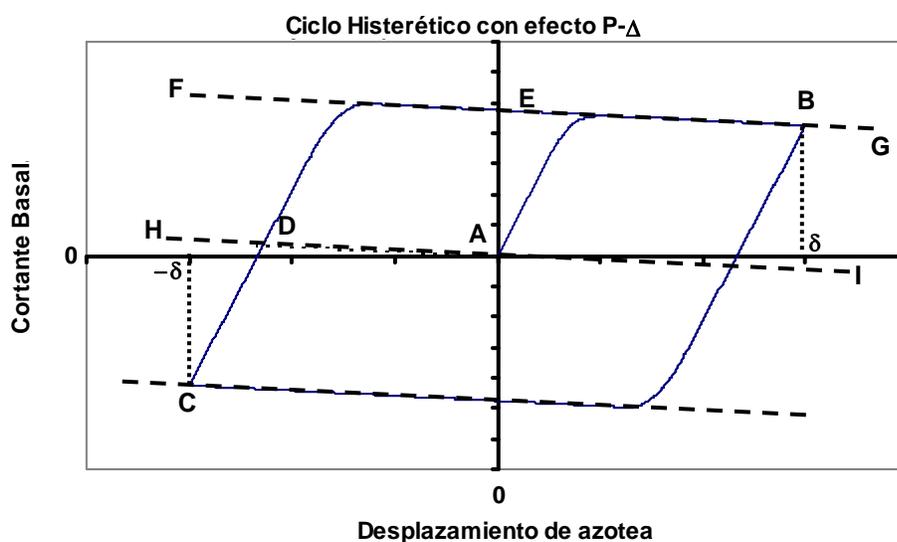
**Figura 2.6** Parámetros asociados a la formación del mecanismo de los marcos en estudio.

En la figura 2.6 se muestra gráficamente el significado de los parámetros que se muestran numéricamente en la tabla 2.1. Se procura que la ductilidad y en su caso la sobrerresistencia crezcan entre submodelos y que el cortante basal último sea el mismo entre estos. Este último hecho es el que define la forma de las curvas puesto que al aumentar la sobrerresistencia y la ductilidad de la estructura la pérdida de rigidez es más gradual y de ahí las diferencias en las curvas entre submodelos de un mismo marco de referencia (Figura 2.4).

### 2.3 Obtención de las curvas de segundo ciclo de empujón histerético.

Un aspecto importante a tomar en cuenta es el cambio en la forma de la transición al mecanismo plástico en ciclos histeréticos posteriores a la primera incursión al rango plástico. Este cambio es más importante cuando se consideran los efectos P- $\Delta$ .

La figura 2.7 muestra la forma de una curva típica cortante basal vs. desplazamiento de azotea para una estructura sometida a un proceso de empujón estático histerético. En la misma figura se muestran también los puntos y las líneas auxiliares que se utilizan para la generación de las curvas de segundo ciclo de empujón estático.



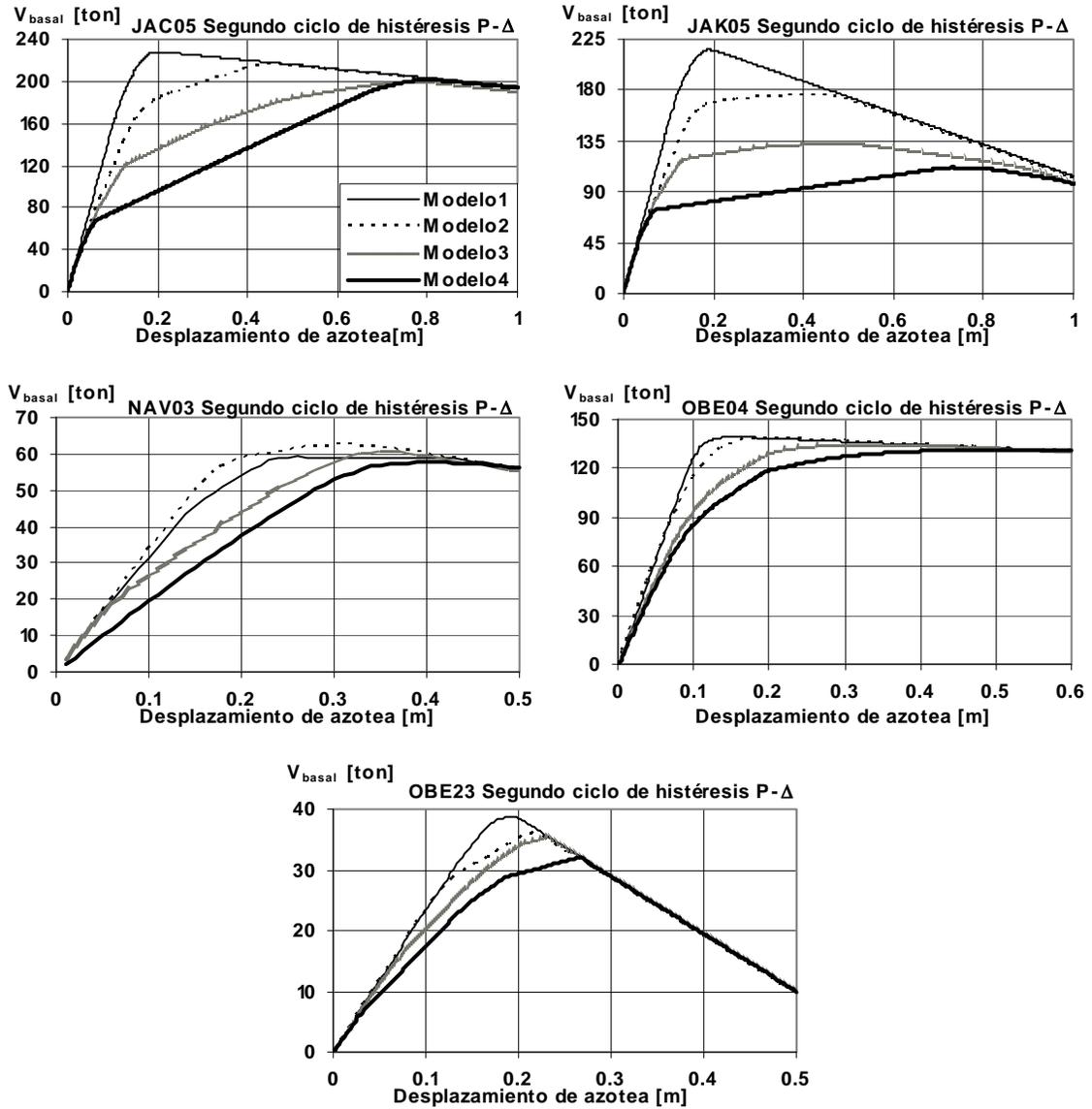
**Figura 2.7** Curva cortante basal vs. desplazamiento de azotea para una estructura sometida a proceso de empujón cíclico.

De la figura 2.7 vemos que la curva que va del punto A al punto B (el punto B de descarga se ha elegido de tal forma que el mecanismo plástico se ha formado en el submodelo en cuestión) denota el comportamiento de la estructura cuando se somete a un proceso de empujón estático hasta determinado nivel de desplazamiento de azotea ( $\delta$ ). Si a partir del punto B se impone un desplazamiento opuesto a la estructura de por ejemplo,  $-\delta$  hasta que llega al punto C y a partir de C se impone nuevamente un desplazamiento de azotea a la estructura de  $2\delta$  hasta el punto B se obtiene una curva cuya transición elasto-plástica es en muchos casos diferente a la monotónica original.

Dada la complejidad del comportamiento histerético cíclico no lineal de las estructuras sujetas a la acción de sismos de gran intensidad, por simplicidad estudiaremos en el presente trabajo las curvas monotónicas (primer ciclo) y la correspondiente al segundo ciclo de histéresis de la curva, obtenida ésta de la siguiente metodología, la cual de forma cualitativa trata de considerar la pendiente negativa de la curva histerética una vez que el mecanismo plástico se ha generado (ver figura 2.7):

- En primer lugar se traza la línea auxiliar FG la cual es paralela a la recta de pendiente negativa de la curva AB que se genera después que el mecanismo de falla de la estructura se ha formado.
- Se traza una paralela a la recta FG (HI) que pase por el origen del sistema de ejes coordenados.
- El punto D donde la recta HI corta a la curva definida por los puntos C y B será el origen de nuestra curva cortante basal contra desplazamiento para el segundo ciclo de histéresis. El punto final (punto E de la figura 2.7) está determinado por el nivel de desplazamiento deseado.

De lo anterior, la figura 2.8 muestra las curvas de segundo ciclo de empujón para los modelos estudiados, en todos los casos el origen del sistema de ejes se ha hecho coincidir con el punto que correspondería al punto D de la figura 2.7.

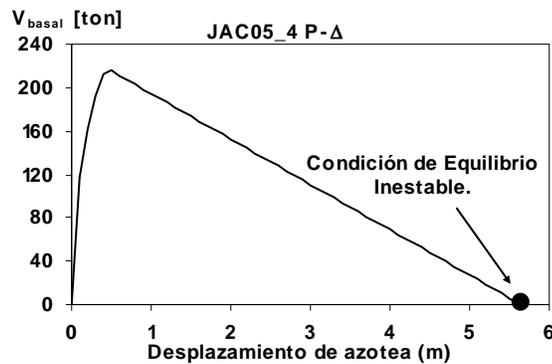


**Figura 2.8** Curvas cortante basal vs. desplazamiento de azotea de los modelos para el segundo ciclo histérico de empujón estático.

Se puede ver de la comparación de las figuras 2.5 y 2.8 que las diferencias en la transición del estado elástico al plástico son más notorias en las curvas del segundo ciclo de empujón estático, más adelante, la importancia de dicha transición en las variaciones del factor de seguridad contra colapso dinámico trata de explicarse en función de la forma de estas curvas.

## 2.4 Trabajo Monotónico Máximo.

Se obtiene el trabajo requerido para llevar a la estructura a un nivel de desplazamientos tal que el cortante actuante asociado sea cero y el patrón de desplazamientos se encuentre en equilibrio inestable con la carga gravitacional ( $Wm$ ). Este parámetro se propone en algunos estudios como un posible indicador de la seguridad contra colapso dinámico en sistemas de varios grados de libertad (Sordo y Félix, 2000, Sordo y Bernal, 1994). La figura 2.9 muestra una curva tipo cortante-desplazamiento típica para la cual se obtiene el trabajo realizado por el sistema para llegar a la condición de cortante basal igual a cero.

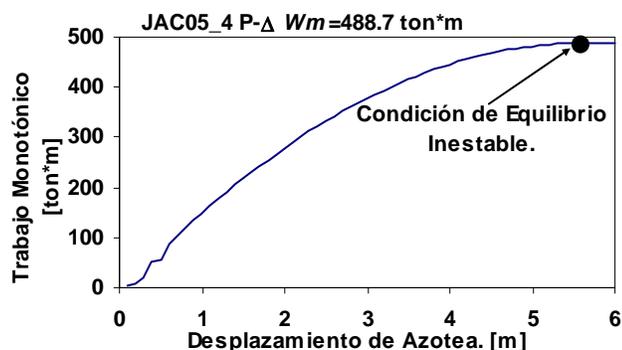


**Figura 2.9** Curva cortante basal contra desplazamiento de azotea submodelo JAC05\_4.

El cálculo del trabajo se hace para todos los submodelos del estudio sometidos a procedimiento de empujón estático ante un patrón de cargas proporcional a las masas de entrepiso, la finalidad es determinar si el trabajo estático es un parámetro que pueda predecir en que casos la transición del estado elástico al plástico en estructuras influye en el factor de seguridad contra colapso dinámico. La figura 2.10 muestra una gráfica del trabajo monotónico contra el desplazamiento de azotea.

El máximo en la curva de la figura 2.10 corresponde al trabajo realizado hasta el punto en el que el cortante basal vale cero en la curva cortante basal *versus* desplazamiento de azotea, definido como  $Wm$  para cada submodelo. En la tabla 2.2 se muestran los valores de  $Wm$  para todos los modelos en estudio para el primer ciclo de empujón estático. La tabla

2.3 muestra los valores de  $W_m$  para todos los modelos en estudio para el segundo ciclo de empujón estático.



**Figura 2.10** Trabajo bajo carga monotónica para el submodelo JAC05\_4.

**Tabla 2.2** Trabajo Monotónico Máximo ( $W_m$  [ton/m]) para el primer ciclo de empujón estático.

PRIMER CICLO					
TRABAJO MONOTÓNICO MÁXIMO [ton*m]					
MODELO	JAC05	JAK05	NAV03	OBE04	OBE23
1	493.200	157.400	52.700	196.800	3.710
2	495.200	159.700	52.400	197.100	3.720
3	495.500	158.700	51.400	197.500	3.650
4	488.700	158.900	49.900	196.200	3.570
Max/min	1.014	1.015	1.056	1.007	1.042

**Tabla 2.3** Trabajo Monotónico Máximo ( $W_m$  [ton/m]) para el segundo ciclo de empujón estático.

SEGUNDO CICLO					
TRABAJO MONOTÓNICO MÁXIMO [ton*m]					
MODELO	JAC05	JAK05	NAV03	OBE04	OBE23
1	494.390	144.100	50.137	196.600	4.890
2	484.130	130.490	50.940	197.020	4.805
3	465.100	155.300	48.340	195.400	4.710
4	445.100	65.900	45.295	192.320	4.460
Max/min	1.111	2.357	1.125	1.024	1.096

De la tabla 2.2 se puede observar que no existen diferencias importantes de los resultados reportados del trabajo monotónico máximo para primer ciclo de empujón estático entre los modelos en estudio, se puede concluir preliminarmente que el trabajo monotónico máximo correspondiente al primer ciclo de empujón estático no es un parámetro indicativo de los casos en que la transición elastoplástica influye sobre el factor de seguridad contra colapso dinámico.

Por otro lado, de la tabla 2.3 se aprecian diferencias de importancia del trabajo monotónico máximo entre submodelos de un mismo marco de referencia especialmente en el caso del marco de referencia JAK05, en general el segundo ciclo muestra mayores diferencias en dicho trabajo, pareciera que tales diferencias pueden predecir en qué casos es influyente la transición del estado elástico al plástico en el factor de seguridad por inestabilidad dinámica como se verá más adelante.

## **2.5 Análisis dinámico de los marcos en estudio.**

### **2.5.1 Registros utilizados en el estudio.**

Los marcos definidos anteriormente se someten a la acción de veinte registros de sismos reales; 16 de los cuales son registros recomendados y clasificados por el Pacific Earthquake Engineering Research Center, (Elgamal *et al.*, 1998). Para información mas detallada acerca de los registros utilizados en el estudio ver el Anexo II.

#### Epicentro cercano Roca (CR)

KOB Kobe, JMA

LUC Landers, Lucerna

LGP Loma Prieta, LGPC

CAP Cape Mendocino

#### Epicentro cercano Suelo (CS)

MEL Imperial Valley, Meloland

NRR Northridge, Rinaldi Receiving st.

PET Cape Mendocino, Petrolia

TAB Tabas Iran, Tabas

Epicentro lejano Roca (LR)	Epicentro lejano Suelo (LS)
VAL Chile, VALU	LLO Chile, Llollelo
CAL Michoacán, Caleta de Campos	TAC Michoacán
OCT Michoacán	SAB Olimpia, Seattle Army Base
OFU Miyagi-oki, Ofunato	TOK Tokachi-oki, Hachinohe Harbor

Adicionalmente a los registros arriba descritos se han utilizado cuatro más que son los que a continuación se mencionan y se hace una clasificación que trata de ser acorde a los grupos señalados por el PEER.

CEN El Centro, California, 1940 (LR)	SCT Ciudad de México, 1985 (LS)
TAF Kern County, 1952 (LR)	CDA Central de Abastos México, (LS)

### 2.5.2 Cálculo del Coeficiente de Colapso Dinámico.

Para cada registro, la respuesta de cada modelo se obtiene para diferentes valores del coeficiente basal de diseño sísmico desde un valor inicial que induce comportamiento elástico hasta un valor para el cual en la estructura el colapso es inminente.

Se define el coeficiente de colapso dinámico ( $C_c$ ), como el valor mínimo del coeficiente sísmico de cortante basal requerido para prevenir la inestabilidad dinámica, en forma aproximada el coeficiente se obtiene a través del factor de escala de las aceleraciones del registro que inducen comportamiento inestable, como se muestra en la ecuación 2.7.

$$C_c = \left( \frac{c}{Q} \right) \frac{1}{I_c} \quad \text{Ecuación 2.7}$$

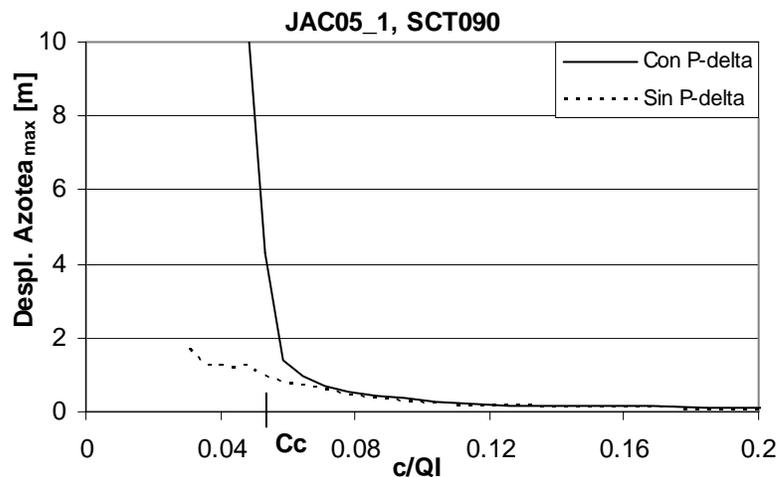
donde

$\frac{c}{Q}$  Coeficiente de cortante basal de diseño.

$I_c$  Factor de escala de las aceleraciones del registro que induce inestabilidad dinámica.

El hecho de amplificar las aceleraciones en los registros acelerométricos no tiene por objeto escalar el sismo en cuestión, es decir, no se busca un nuevo registro amplificado con respecto al original, sino, como se mencionó anteriormente obtener en forma aproximada el coeficiente de colapso dinámico.

En la figura 2.11 se ha obtenido una curva desplazamiento de azotea máximo contra coeficiente sísmico de cortante basal de diseño, dicho coeficiente se reduce de manera aproximada escalando las aceleraciones del registro en cuestión, así para un factor de aceleraciones de uno el coeficiente basal toma el valor de 0.2, se hace el análisis dinámico y se toma el valor del desplazamiento máximo de la estructura, siendo este el primer punto de la curva. Se reduce el coeficiente basal (amplificando las aceleraciones del registro) y se vuelve a obtener el desplazamiento máximo de la estructura durante su respuesta, el proceso continúa hasta que el desplazamiento máximo de la estructura considerando efectos P- $\Delta$  es cuatro veces el desplazamiento máximo sin considerar tales efectos, este último valor del coeficiente basal de diseño sísmico es el coeficiente de colapso dinámico ( $C_c$ ).



**Figura 2.11** Coeficiente de Colapso ( $C_c$ ) para la estructura JAC05\_1 sometida a un análisis dinámico (registro SCT090).

De la figura 2.11 se puede ver cómo se obtiene el coeficiente de colapso ( $C_c$ ) en un caso típico y la influencia que sobre la estructura tiene el considerar los efectos P- $\Delta$  cuando ésta se somete a registros acelerométricos.

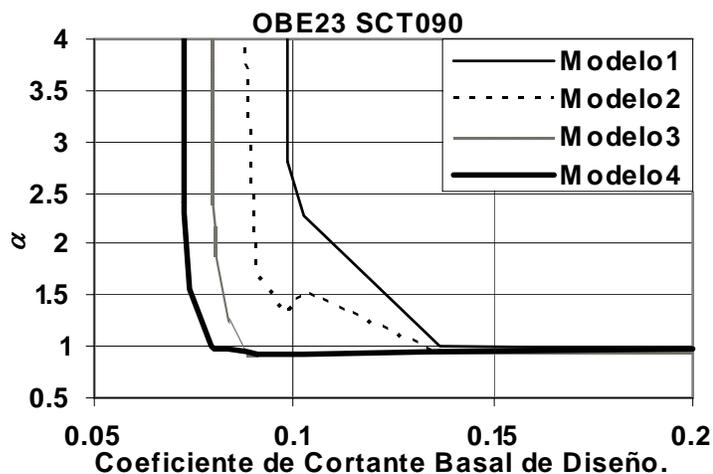
Para detectar con mayor seguridad el valor de  $C_c$ , se evalúan los desplazamientos máximos con efectos P- $\Delta$  en relación a dichos valores obtenidos sin considerar los efectos mencionados. El efecto que la carga gravitacional tiene sobre la estructura es notorio cuando el coeficiente de diseño sísmico se acerca al coeficiente de colapso ya que la relación antes mencionada comienza a incrementarse rápidamente hasta que las amplificaciones en el desplazamiento por efecto P- $\Delta$  llegan a crecer asintóticamente.

En la figura 2.12 se puede ver un grupo de curvas típicas para un conjunto de estructuras (submodelos del marco de referencia OBE23) sometidas a análisis dinámicos, en el eje de las ordenadas se gráfica el cociente del desplazamiento máximo de azotea con efecto P- $\Delta$  y el desplazamiento máximo de azotea sin efecto P- $\Delta$  (amplificación de desplazamiento máximo de azotea por efecto P- $\Delta$ ,  $\alpha$ ) en función del correspondiente coeficiente de cortante basal de diseño sísmico (eje de las abscisas), dichos valores estimados como se indicó en párrafos anteriores.

El acelerograma utilizado para generar las curvas de la figura 2.12 es SCT090 el cual corresponde al sismo del 19 de septiembre de 1985 registrado en la estación de la Secretaría de Comunicaciones y Transportes. Es claro como las amplificaciones en el desplazamiento por efecto P- $\Delta$  para ciertos coeficientes de diseño sísmico crecen irreversiblemente cuando este último coeficiente se acerca al coeficiente de colapso dinámico ( $C_c$ ).

Para efectos de este estudio, se considera que se alcanza la inestabilidad cuando el desplazamiento máximo de azotea es cuatro veces aquel obtenido de un análisis sin efectos P- $\Delta$ , pues como se ve de la figura 2.12 cuando se alcanza esta amplificación de desplazamientos por efectos P- $\Delta$  el sistema no recobra ya la estabilidad y se alcanza el estado límite de inestabilidad dinámica. El análisis dinámico se hace con ayuda del

programa de análisis estructural Drain 2Dx, en todos los casos se ha supuesto un porcentaje del amortiguamiento crítico del 2% y un endurecimiento por deformación del 0% del módulo de elasticidad del acero.



**Figura 2.12** Amplificaciones por P- $\Delta$  para diferentes Coeficientes Basales de diseño.

Los resultados obtenidos del análisis descrito en el párrafo precedente (coeficientes de colapso dinámico) se muestran en la tabla 2.4 donde se han agrupado los submodelos de cada marco de referencia y los registros de acuerdo a la clasificación propuesta.

La tabla 2.5 muestra los coeficientes de colapso dinámico normalizados al valor máximo que toma éste entre submodelos para cada registro utilizado, se resaltan valores con diferencias mayores a un 20%.

**Tabla 2.4** Coeficientes de colapso para cada modelo en estudio.

Cc JAC05 $\alpha=4$		JAC05_1	JAC05_2	JAC05_3	JAC05_4	Cc JAK05 $\alpha=4$		JAK05_1	JAK05_2	JAK05_3	JAK05_4
CR	CAP000	0.0402	0.0402	0.0402	0.0402	CR	CAP000	0.0862	0.0862	0.0862	0.0862
	KOB000	0.0486	0.0486	0.0442	0.0402		KOB000	0.1147	0.1043	0.1147	0.0948
	LGP000	0.0712	0.0712	0.0712	0.0783		LGP000	0.1262	0.1262	0.1262	0.1262
	LUC000	0.0128	0.0128	0.0128	0.0128		LUC000	0.0402	0.0365	0.0402	0.0365
CS	MEL000	0.0365	0.0365	0.0365	0.0365	CS	MEL000	0.0648	0.0648	0.0712	0.0712
	NRR228	0.0486	0.0486	0.0486	0.0442		NRR228	0.1147	0.1043	0.1147	0.1147
	PET000	0.0302	0.0302	0.0302	0.0302		PET000	0.0648	0.0648	0.0712	0.0648
	TAB074	0.0712	0.0712	0.0783	0.0712		TAB074	0.1679	0.1527	0.1679	0.1527
LR	CAL000	0.0206	0.0188	0.0188	0.0155	LR	CAL000	0.0402	0.0332	0.0365	0.0302
	OCT180	0.0054	0.0060	0.0060	0.0054		OCT180	0.0128	0.0117	0.0117	0.0096
	OFU041	0.0060	0.0054	0.0060	0.0049		OFU041	0.0155	0.0128	0.0128	0.0117
	VAL070	0.0128	0.0128	0.0128	0.0128		VAL070	0.0365	0.0365	0.0365	0.0332
	CEN000	0.0250	0.0227	0.0227	0.0227		CEN000	0.0589	0.0535	0.0589	0.0365
TAF021	0.0117	0.0106	0.0106	0.0106	TAF021	0.0402	0.0332	0.0332	0.0250		
LS	LLO010	0.0589	0.0486	0.0486	0.0365	LS	LLO010	0.1147	0.0948	0.0948	0.0589
	SAB182	0.0141	0.0128	0.0128	0.0088		SAB182	0.0275	0.0206	0.0227	0.0171
	TAC180	0.0080	0.0080	0.0066	0.0060		TAC180	0.0155	0.0128	0.0141	0.0128
	TOK000	0.0332	0.0332	0.0332	0.0302		TOK000	0.0648	0.0589	0.0648	0.0535
	SCT090	0.0589	0.0589	0.0648	0.0648		SCT090	0.0948	0.0948	0.0948	0.0948
CDA000	0.0302	0.0332	0.0332	0.0332	CDA000	0.0712	0.0648	0.0442	0.0442		

Cc NAV03 $\alpha=4$		NAV03_1	NAV03_2	NAV03_3	NAV03_4	Cc OBE04 $\alpha=4$		OBE04_1	OBE04_2	OBE04_3	OBE04_4
CR	CAP000	0.0862	0.0862	0.0948	0.0948	CR	CAP000	0.0365	0.0365	0.0365	0.0365
	KOB000	0.0648	0.0862	0.0712	0.0648		KOB000	0.0535	0.0535	0.0535	0.0535
	LGP000	0.2234	0.2234	0.2234	0.2234		LGP000	0.0712	0.0712	0.0712	0.0712
	LUC000	0.0402	0.0402	0.0442	0.0486		LUC000	0.0155	0.0155	0.0141	0.0141
CS	MEL000	0.0948	0.0948	0.0948	0.0948	CS	MEL000	0.0332	0.0332	0.0332	0.0332
	NRR228	0.1527	0.1679	0.1527	0.1527		NRR228	0.0365	0.0365	0.0402	0.0402
	PET000	0.0783	0.0783	0.0712	0.0648		PET000	0.0302	0.0302	0.0302	0.0302
	TAB074	0.1527	0.1679	0.1679	0.1527		TAB074	0.0402	0.0365	0.0365	0.0365
LR	CAL000	0.0332	0.0486	0.0486	0.0486	LR	CAL000	0.0188	0.0171	0.0155	0.0128
	OCT180	0.0096	0.0117	0.0117	0.0117		OCT180	0.0060	0.0060	0.0060	0.0054
	OFU041	0.0128	0.0141	0.0106	0.0096		OFU041	0.0049	0.0049	0.0054	0.0054
	VAL070	0.0442	0.0442	0.0250	0.0302		VAL070	0.0141	0.0141	0.0141	0.0141
	CEN000	0.0589	0.0589	0.0589	0.0589		CEN000	0.0227	0.0227	0.0227	0.0250
TAF021	0.0275	0.0275	0.0250	0.0250	TAF021	0.0106	0.0096	0.0088	0.0088		
LS	LLO010	0.0783	0.0648	0.0648	0.0589	LS	LLO010	0.0589	0.0589	0.0535	0.0535
	SAB182	0.0141	0.0128	0.0106	0.0096		SAB182	0.0155	0.0141	0.0117	0.0106
	TAC180	0.0171	0.0250	0.0206	0.0206		TAC180	0.0066	0.0066	0.0060	0.0054
	TOK000	0.1043	0.1043	0.0948	0.0862		TOK000	0.0250	0.0227	0.0227	0.0227
	SCT090	0.3271	0.3598	0.2458	0.2234		SCT090	0.0535	0.0535	0.0535	0.0535
CDA000	0.0712	0.0783	0.0862	0.0948	CDA000	0.0302	0.0302	0.0275	0.0302		

Cc OBE23 $\alpha=4$		OBE23_1	OBE23_2	OBE23_3	OBE23_4
CR	CAP000	0.3271	0.3271	0.3271	0.3271
	KOB000	0.4789	0.4789	0.4789	0.4789
	LGP000	0.6376	0.7013	0.7013	0.7013
	LUC000	0.1679	0.1679	0.1679	0.1679
CS	MEL000	0.2974	0.3271	0.3271	0.3271
	NRR228	0.4354	0.4354	0.4354	0.4354
	PET000	0.2458	0.2458	0.2703	0.2458
	TAB074	0.7013	0.7013	0.7013	0.6376
LR	CAL000	0.2234	0.2234	0.2031	0.1847
	OCT180	0.0535	0.0589	0.0589	0.0589
	OFU041	0.0535	0.0535	0.0486	0.0486
	VAL070	0.1679	0.1679	0.1527	0.1388
	CEN000	0.2974	0.2703	0.2703	0.2234
TAF021	0.1262	0.1262	0.1262	0.1147	
LS	LLO010	0.3598	0.2703	0.3271	0.2974
	SAB182	0.0712	0.0712	0.0712	0.0712
	TAC180	0.0862	0.0712	0.0712	0.0648
	TOK000	0.2703	0.2458	0.2458	0.2458
	SCT090	1.1293	1.0267	0.9333	0.8485
CDA000	0.2703	0.2703	0.2703	0.2703	

**Tabla 2.5** Coeficientes de colapso normalizados al valor máximo de cada submodelo.

Cc JAC05 $\alpha=4$		JAC05_1	JAC05_2	JAC05_3	JAC05_4	Cc JAK05 $\alpha=4$		JAK05_1	JAK05_2	JAK05_3	JAK05_4
CR	CAP000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	CR	CAP000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	KOB000	1.0000	1.0000	0.9091	0.8265		KOB000	1.0000	0.9093	1.0000	0.8266
	LGP000	0.9092	0.9092	0.9092	1.0000		LGP000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	LUC000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000		LUC000	1.0000	0.9090	1.0000	0.9090
CS	MEL000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	CS	MEL000	0.9090	0.9090	1.0000	1.0000
	NRR228	1.0000	1.0000	1.0000	0.9091		NRR228	1.0000	0.9093	1.0000	1.0000
	PET000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000		PET000	0.9090	0.9090	1.0000	0.9090
	TAB074	0.9092	0.9092	1.0000	0.9092		TAB074	1.0000	0.9091	1.0000	0.9091
LR	CAL000	1.0000	0.9094	0.9094	<b>0.7513</b>	LR	CAL000	1.0000	0.8264	0.9090	<b>0.7512</b>
	OCT180	0.9080	1.0000	1.0000	0.9080		OCT180	1.0000	0.9094	0.9094	<b>0.7510</b>
	OFU041	1.0000	0.9080	1.0000	0.8261		OFU041	1.0000	0.8265	0.8265	<b>0.7516</b>
	VAL070	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000		VAL070	1.0000	1.0000	1.0000	0.9091
	CEN000	1.0000	0.9091	0.9091	0.9091		CEN000	1.0000	0.9089	1.0000	<b>0.6208</b>
	TAF021	1.0000	0.9090	0.9090	0.9090		TAF021	1.0000	0.8264	0.8264	<b>0.6209</b>
LS	LLO010	1.0000	0.8264	0.8264	<b>0.6208</b>	LS	LLO010	1.0000	0.8266	0.8266	<b>0.5133</b>
	SAB182	1.0000	0.9092	0.9092	<b>0.6210</b>		SAB182	1.0000	<b>0.7513</b>	0.8263	<b>0.6209</b>
	TAC180	1.0000	1.0000	0.8264	<b>0.7522</b>		TAC180	1.0000	0.8265	0.9090	0.8265
	TOK000	1.0000	1.0000	1.0000	0.9091		TOK000	1.0000	0.9090	1.0000	0.8263
	SCT090	0.9090	0.9090	1.0000	1.0000		SCT090	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	CDA000	0.9091	1.0000	1.0000	1.0000		CDA000	1.0000	0.9090	<b>0.6208</b>	<b>0.6208</b>

Cc NAV03 $\alpha=4$		NAV03_1	NAV03_2	NAV03_3	NAV03_4	Cc OBE04 $\alpha=4$		OBE04_1	OBE04_2	OBE04_3	OBE04_4
CR	CAP000	0.9091	0.9091	1.0000	1.0000	CR	CAP000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	KOB000	<b>0.7514</b>	1.0000	0.8266	<b>0.7514</b>		KOB000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	LGP000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000		LGP000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	LUC000	0.8265	0.8265	0.9091	1.0000		LUC000	1.0000	1.0000	0.9090	0.9090
CS	MEL000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000	CS	MEL000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	NRR228	0.9091	1.0000	0.9091	0.9091		NRR228	0.9090	0.9090	1.0000	1.0000
	PET000	1.0000	1.0000	0.9092	0.8265		PET000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	TAB074	0.9091	1.0000	1.0000	0.9091		TAB074	1.0000	0.9090	0.9090	0.9090
LR	CAL000	<b>0.6830</b>	1.0000	1.0000	1.0000	LR	CAL000	1.0000	0.9088	0.8262	<b>0.6828</b>
	OCT180	0.8258	1.0000	1.0000	1.0000		OCT180	1.0000	1.0000	1.0000	0.9080
	OFU041	0.9092	1.0000	<b>0.7516</b>	<b>0.6828</b>		OFU041	0.9098	0.9098	1.0000	1.0000
	VAL070	1.0000	1.0000	<b>0.5645</b>	<b>0.6829</b>		VAL070	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	CEN000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000		CEN000	0.9091	0.9091	0.9091	1.0000
	TAF021	1.0000	1.0000	0.9090	0.9090		TAF021	1.0000	0.9084	0.8263	0.8263
LS	LLO010	1.0000	0.8265	0.8265	<b>0.7513</b>	LS	LLO010	1.0000	1.0000	0.9089	0.9089
	SAB182	1.0000	0.9092	<b>0.7516</b>	<b>0.6828</b>		SAB182	1.0000	0.9090	<b>0.7516</b>	<b>0.6832</b>
	TAC180	<b>0.6831</b>	1.0000	0.8265	0.8265		TAC180	1.0000	1.0000	0.9102	0.8265
	TOK000	1.0000	1.0000	0.9090	0.8263		TOK000	1.0000	0.9091	0.9091	0.9091
	SCT090	0.9091	1.0000	<b>0.6830</b>	<b>0.6209</b>		SCT090	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	CDA000	<b>0.7515</b>	0.8265	0.9091	1.0000		CDA000	1.0000	1.0000	0.9093	1.0000

Cc OBE04 $\alpha=4$		OBE23_1	OBE23_2	OBE23_3	OBE23_4
CR	CAP000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	KOB000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	LGP000	0.9091	1.0000	1.0000	1.0000
	LUC000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
CS	MEL000	0.9091	1.0000	1.0000	1.0000
	NRR228	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	PET000	0.9091	0.9091	1.0000	0.9091
	TAB074	1.0000	1.0000	1.0000	0.9091
LR	CAL000	1.0000	1.0000	0.9091	0.8266
	OCT180	0.9089	1.0000	1.0000	1.0000
	OFU041	1.0000	1.0000	0.9092	0.9092
	VAL070	1.0000	1.0000	0.9091	0.8265
	CEN000	1.0000	0.9090	0.9090	<b>0.7512</b>
	TAF021	1.0000	1.0000	1.0000	0.9089
LS	LLO010	1.0000	<b>0.7513</b>	0.9091	0.8265
	SAB182	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000
	TAC180	1.0000	0.8266	0.8266	<b>0.7514</b>
	TOK000	1.0000	0.9091	0.9091	0.9091
	SCT090	1.0000	0.9091	0.8264	<b>0.7514</b>
	CDA000	1.0000	1.0000	1.0000	1.0000

La información resumida en la tabla 2.5 se sintetiza en la tabla 2.6 en la que se presenta para cada marco de referencia el coeficiente de colapso dinámico menor de todos los submodelos normalizado al coeficiente mayor de todos ellos. Se resalta en las tablas cuáles son los valores que implican diferencias mayores a un 20%, los cuales se podría afirmar presentan una variación importante en el factor de seguridad contra inestabilidad dinámica.

**Tabla 2.6** Coeficientes de colapso mínimos normalizados al valor máximo de cada submodelo.

$C_{c_{\min}} \alpha=4$		JAC05 T=1.1 seg $\Theta=0.024$	JAK05 T=1.1 seg $\Theta=0.15$	NAV03 T=1.8 seg $\Theta=0.10$	OBE04 T=0.9 seg $\Theta=0.0045$	OBE23 T=2.1 seg $\Theta=0.30$
CR	CAP000	1.0000	1.0000	0.9091	1.0000	1.0000
	KOB000	0.8265	0.8266	<b>0.7514</b>	1.0000	1.0000
	LGP000	0.9091	1.0000	1.0000	1.0000	0.9091
	LUC000	1.0000	0.9090	0.8265	0.9090	1.0000
CS	MEL000	1.0000	0.9090	1.0000	1.0000	0.9091
	NRR228	0.9092	0.9093	0.9091	0.9090	1.0000
	PET000	1.0000	0.9090	0.8265	1.0000	0.9091
	TAB074	0.9092	0.9091	0.9091	0.9090	0.9091
LR	CAL000	<b>0.7513</b>	<b>0.7512</b>	<b>0.6830</b>	<b>0.6828</b>	0.8266
	OCT180	0.9080	<b>0.7510</b>	0.8258	0.9080	0.9089
	OFU041	0.8261	<b>0.7516</b>	<b>0.6828</b>	0.9098	0.9092
	VAL070	1.0000	0.9091	<b>0.5645</b>	1.0000	0.8265
	CEN000	0.9091	<b>0.6208</b>	1.0000	0.9091	<b>0.7512</b>
	TAF021	0.9090	<b>0.6209</b>	0.9090	0.8263	0.9089
LS	LLO010	<b>0.6208</b>	<b>0.5133</b>	<b>0.7513</b>	0.9089	<b>0.7513</b>
	SAB182	<b>0.6210</b>	<b>0.6209</b>	<b>0.6828</b>	<b>0.6832</b>	1.0000
	TAC180	<b>0.7522</b>	0.8265	<b>0.6831</b>	0.8265	<b>0.7514</b>
	TOK000	0.9091	0.8263	0.8263	0.9091	0.9091
	SCT090	0.9090	1.0000	<b>0.6209</b>	1.0000	<b>0.7514</b>
	CDA000	0.9090	<b>0.6208</b>	<b>0.7515</b>	0.9093	1.0000

De las tablas anteriores se puede observar que, para sismos cercanos epicentralmente no parece haber influencia en la forma en que se desarrolla el mecanismo plástico. Sin embargo, para la mayoría de sismos de generación lejana existen diferencias importantes en la seguridad contra colapso dependiendo de la forma en la que se produzca la transición del estado elástico al mecanismo de colapso. En particular se observa que los modelos JAK05 y NAV03 son los que presentan mayores diferencias, en forma consistente con el hecho de ser éstos los marcos en los que se observan diferencias más notables en el comportamiento

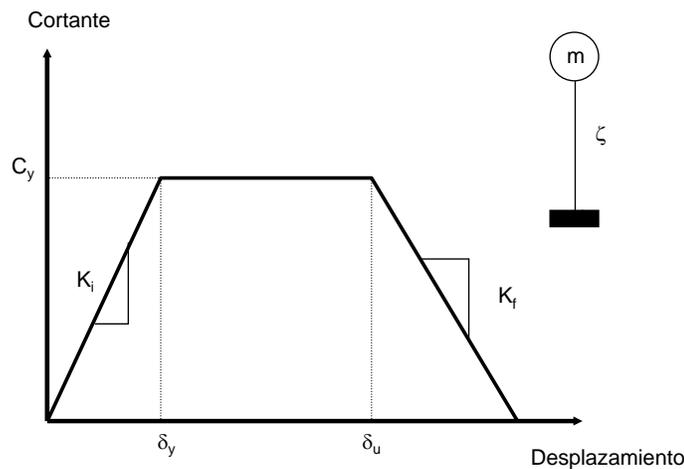
de las curvas de segundo ciclo de empujón estático con efectos  $P-\Delta$  asociadas a los diferentes submodelos, como se ve de la figura 2.8. En el modelo JAC05 pese a existir importantes diferencias en las curvas de segundo ciclo, el coeficiente de colapso es relativamente pequeño, por lo que disminuyen las diferencias entre los coeficientes de colapso de los diferentes submodelos.

Del análisis de las tablas 2.3 y 2.6 se puede comentar que existe cierta relación entre las diferencias encontradas en el trabajo de segundo ciclo de empujón estático para cada marco de referencia y las diferencias que existen en los coeficientes de colapso entre submodelos de un mismo marco de referencia. Los marcos de referencia NAV03 y JAK05 son los que muestran mayores diferencias en cuanto al trabajo de segundo ciclo, consistentemente con el hecho de que son estos marcos los que presentan las diferencias más grandes en cuanto al coeficiente de colapso se refiere, por otro lado el marco de referencia OBE23 muestra diferencias casi nulas para ambos casos, trabajo estático de segundo ciclo y coeficientes de colapso.

De lo anterior se podría afirmar que comparando dos estructuras con las mismas propiedades elásticas, cortante basal último resistente y forma del mecanismo, pero con diferente transición entre el estado elástico y el plástico sometidas a análisis dinámicos; aquella con transición al mecanismo de falla mas paulatina y con trabajo estático de segundo ciclo menor ( $Wm$ ) tendrá un factor de seguridad mayor contra inestabilidad dinámica.

# CAPÍTULO 3. SISTEMAS DE UN GRADO DE LIBERTAD CON COMPORTAMIENTO HISTERÉTICO TRILINEAL.

## 3.1 Parámetros asociados a los Sistemas de un Grado de Libertad Trilineales.



$$K_i = \left( \frac{2\pi}{T_0} \right)^2 \quad \theta = \frac{K_f}{K_i} \quad \mu_t = \frac{\delta_u}{\delta_y}$$

**Figura 3.1** Características de los Sistemas de un Grado de Libertad Trilineales en estudio.

Como segunda parte de este trabajo se estudia el comportamiento de sistemas de un grado de libertad trilineales (SUGLT) para tratar de determinar que parámetros influyen en el efecto de la transición elasto plástica en la seguridad contra inestabilidad dinámica. Los SUGLT que se estudian se caracterizan por los siguientes parámetros:

- $C_y$     Coeficiente de fluencia del SUGLT.
- $\theta$      Coeficiente de estabilidad del sistema.
- $\xi$      Porcentaje del amortiguamiento crítico.

$\mu_t$  Ductilidad del tramo de transición.

$T_0$  Periodo inicial.

La figura 3.1 muestra esquemáticamente los parámetros antes definidos.

### 3.2 Análisis dinámico de los SUGLT.

Se efectúa un análisis paramétrico de sistemas de un grado de libertad con ciclo histerético trilineal generados para el estudio, tales sistemas se someten a análisis dinámicos para determinar parámetros asociados a su respuesta ante sollicitaciones sísmicas (coeficiente de fluencia asociado al desplazamiento de colapso, trabajo monotónico máximo y energía total máxima) dichos parámetros se definen mas adelante.

Los análisis dinámicos se hacen con ayuda del programa TRILIN, el cual efectúa análisis no lineales paso a paso de sistemas con ciclo histerético trilineal mediante el método de la aceleración constante promedio, y considerando los algoritmos de localización de eventos (descarga y fluencia dentro del paso de integración) propuestos por Bernal (1991), así como cuidando diversos aspectos relacionados con la precisión de los cálculos para evitar que inestabilidades numéricas puedan esconder el fenómeno en estudio. El programa de análisis lineal paso a paso se calibró con resultados obtenidos del programa de análisis estructural DRAIN 2DX (Prakash *et al.*, 1993) obteniendo resultados idénticos en diversos casos.

Los registros acelerográficos utilizados en el análisis dinámico de sistemas de un grado de libertad con ciclo histerético trilineal son aquellos descritos en la sección 2.5.1 del capítulo 2. para información más detallada de los registros en estudio ver el anexo II.

Para el análisis paramétrico de los SUGLT se utilizan los siguientes valores de los parámetros en estudio.

$$\mu_t = 1, 2, 3, 4, 5$$

$$\xi = 0.02, 0.05$$

$T_0 =$  de 0.4 a 4.83 segs

$\theta = \theta_{min}, \theta_{max}$

donde:

$$\theta_{min} = 0.012T_0^{0.64}$$

**Ecuación 3.1**

Coefficiente de estabilidad mínimo, el cual le correspondería a una estructura con mecanismo de falla global donde el efecto de la carga gravitacional, por ser ésta moderada no desestabiliza de manera importante al sistema (Bernal, 1992).

$$\theta_{max} = 0.082T_0^{1.44}$$

**Ecuación 3.2**

Coefficiente de estabilidad máximo, el cual corresponde a un valor crítico del coeficiente de estabilidad y que se asocia a un sistema estructural que presenta falla de piso suave donde el efecto desestabilizador de la carga gravitacional es muy grande (Bernal, 1992).

### **3.2.1 Espectros de Resistencia de Colapso.**

Se realiza un proceso iterativo con TRILIN a través del cual se reduce paulatinamente el coeficiente de fluencia del SUGLT hasta que el sistema sometido a análisis dinámicos alcanza un cierto nivel de desplazamiento (desplazamiento de colapso,  $\delta_c$ ) durante su respuesta dinámica, definido como el desplazamiento para el cual el cortante en el sistema es cero en una curva cortante vs. desplazamiento, tal desplazamiento se muestra esquemáticamente en la figura 3.2.

El proceso iterativo para la generación de espectros de resistencia de colapso se sintetiza en los siguientes pasos.

1. El proceso inicia proponiendo los parámetros antes definidos (ductilidad de transición, porcentaje del amortiguamiento crítico, periodo del SUGLT y el coeficiente de estabilidad) y un cortante de fluencia muy grande que asegure

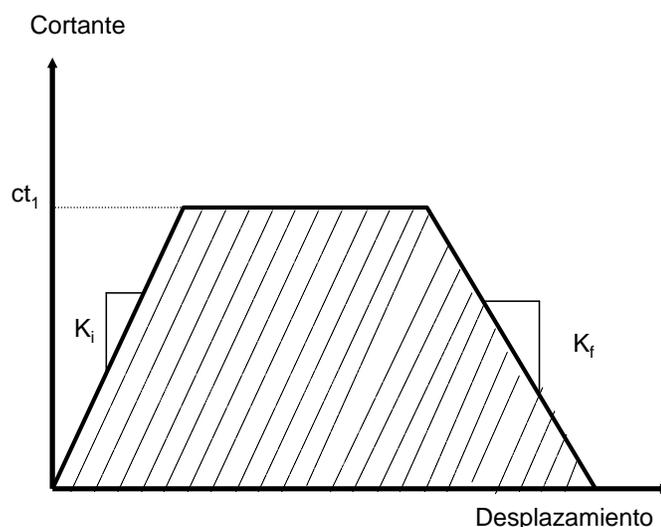


igual a uno (sistema bilineal), para los diferentes valores paramétricos estudiados. Los espectros se agrupan de acuerdo al tipo de suelo y a la distancia de la estación del registro al epicentro del mismo. El análisis de resultados se presenta en la sección 3.3.

### 3.2.2 Espectros de Trabajo Monotónico Máximo.

Se obtienen también los espectros del trabajo monotónico máximo ( $W_c$ ) asociado a los estados de colapso, es decir, se obtiene el trabajo monotónico máximo del SUGLT cuando su respuesta dinámica máxima es superior al desplazamiento de colapso. Los espectros de trabajo monotónico máximo se normalizan al espectro correspondiente del SUGLT con ductilidad transicional igual a uno, y se presenta en raíz cuadrada, debido a que existe una proporcionalidad entre  $W_c$  y la resistencia elevada al cuadrado.

El trabajo monotónico máximo se define como el área bajo la curva cortante desplazamiento del SUGLT, como lo ilustra la figura 3.3. En la figura,  $ct_1$  como se mencionó anteriormente, es el coeficiente de fluencia asociado al desplazamiento de colapso, el área sombreada corresponde al trabajo monotónico máximo asociado a cada caso.



**Figura 3.3** Trabajo Monotónico Máximo de los SUGLT.

Los espectros así definidos se muestran en el anexo IV. El análisis de resultados se presenta en la sección 3.3.

### **3.2.3 Espectros de Energía Total Máxima de Colapso de los SUGLT.**

Se generan espectros de la energía total máxima ( $E_{tm}$ ) disipada por el sistema en la respuesta asociada al umbral de la inestabilidad dinámica. Los espectros se construyen con la raíz cuadrada de la energía total máxima de los SUGLT para ductilidades transicionales de uno, dos, tres, cuatro y cinco, normalizadas a la raíz cuadrada de la energía total máxima del SUGLT con ductilidad transicional igual a uno (sistema bilineal).

La energía total máxima disipada durante la respuesta dinámica por los SUGLT queda definida por la siguiente expresión.

$$E_{tm} = E_c + E_h + E_a \quad \text{Ecuación 3.3}$$

donde

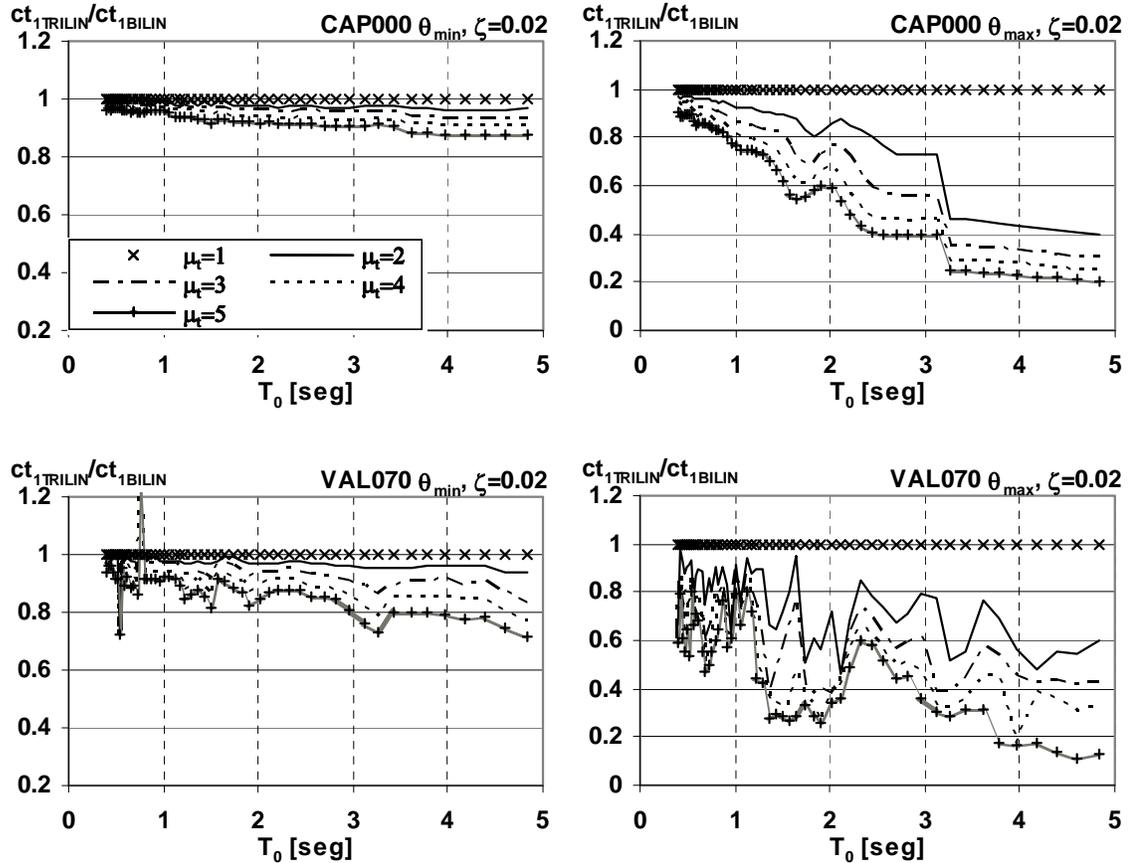
- $E_c$     Energía cinética disipada.
- $E_h$     Energía histerética disipada.
- $E_a$     Energía de amortiguamiento disipada.

Las figuras correspondientes a los espectros de energía total máxima para los sismos en estudio y para los diferentes parámetros considerados se muestran en el anexo V. El análisis de resultados se presenta en la sección 3.3

### **3.3 Sistemas de un Grado de Libertad Trilineales. Análisis de resultados.**

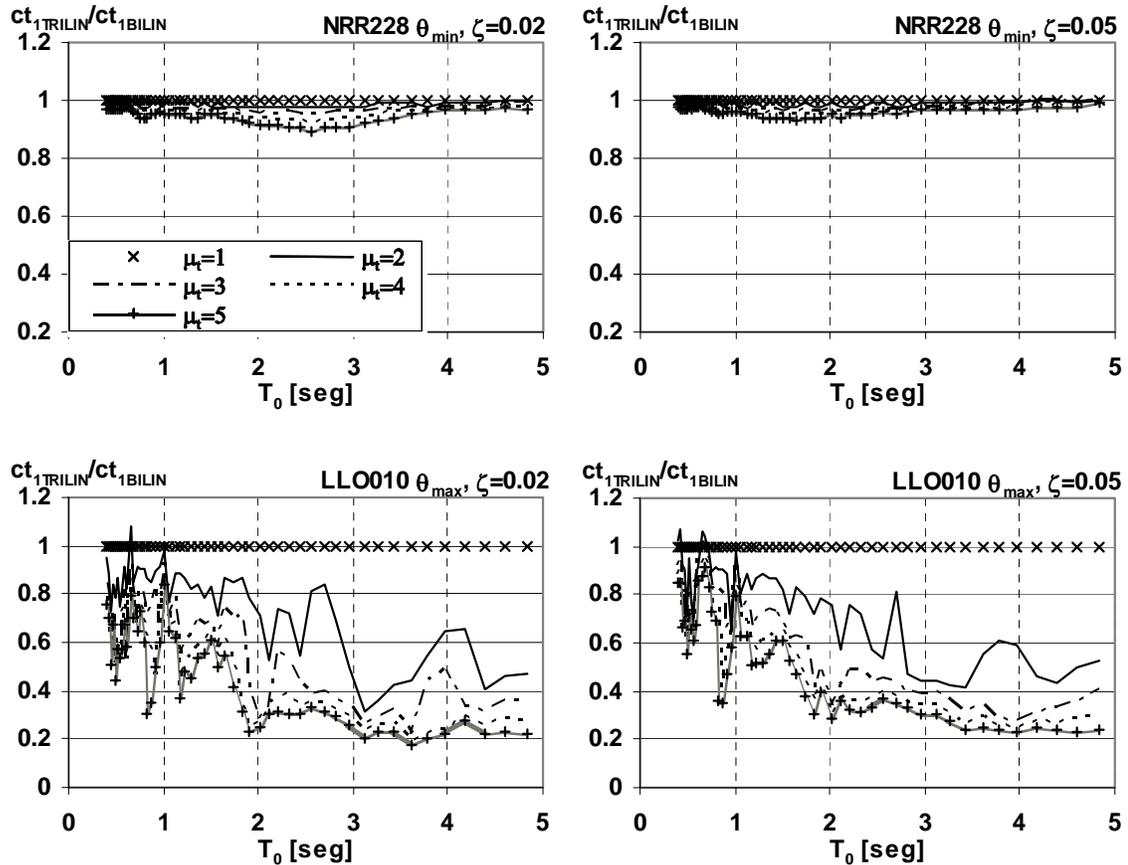
De los espectros mostrados en los anexos del trabajo se puede sintetizar que las diferencias entre los parámetros normalizados (coeficiente de fluencia asociado al desplazamiento de

colapso, trabajo monotónico de colapso y energía total máxima), en lo general crecen con el periodo y se presentan mayores diferencias en los casos en que los espectros se generan para el coeficiente de estabilidad máximo que para el mínimo como era de esperarse. Estas afirmaciones tratan de ilustrarse en la figura 3.4 para el caso del coeficiente de fluencia asociado al desplazamiento de colapso.



**Figura 3.4** Resistencia de Colapso para dos registros utilizados en el estudio, se muestra la diferencia entre el coeficiente de estabilidad mínimo y máximo.

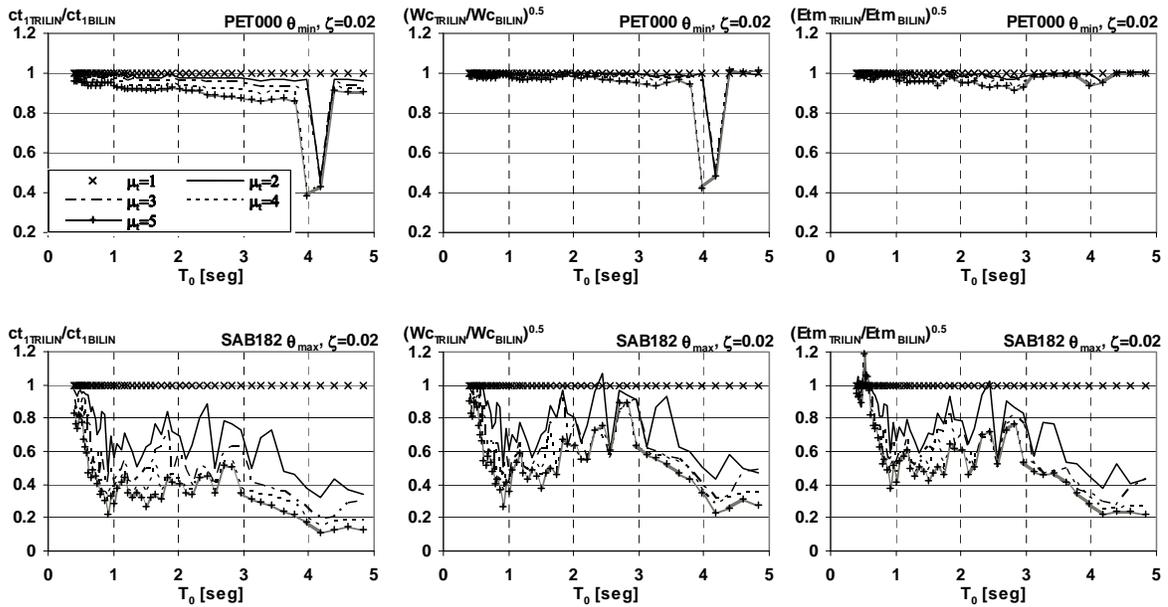
Una observación importante que resulta de la figura 3.5 y en general del trabajo realizado es que el fenómeno de la inestabilidad dinámica parece no relacionarse con el porcentaje del amortiguamiento crítico, por lo menos para los dos valores estudiados en el presente trabajo; para espectros del mismo registro en estudio y que comparten el coeficiente de estabilidad, solamente con diferente porcentaje de amortiguamiento crítico no se aprecian diferencias significativas como se muestra en la figura antes mencionada.



**Figura 3.5** Resistencia de Colapso para dos registros utilizados en el estudio, se muestra la no dependencia del porcentaje del amortiguamiento crítico.

Un aspecto más que parece importante destacar es el hecho de que en los espectros de energía total máxima de colapso ( $E_{tm}$ ), las diferencias entre las curvas son por lo general menos pronunciadas y con menos diferencias abruptas (picos extremos en los espectros por ejemplo), lo que conduce a la idea de que los espectros de energía total máxima son un mejor indicador de las diferencias reales en el comportamiento de los SUGLT debidas a la ductilidad desarrollada por el sistema.

La figura 3.6 muestra una comparación de espectros de resistencia de colapso, trabajo monótonico de colapso y energía total máxima de colapso.



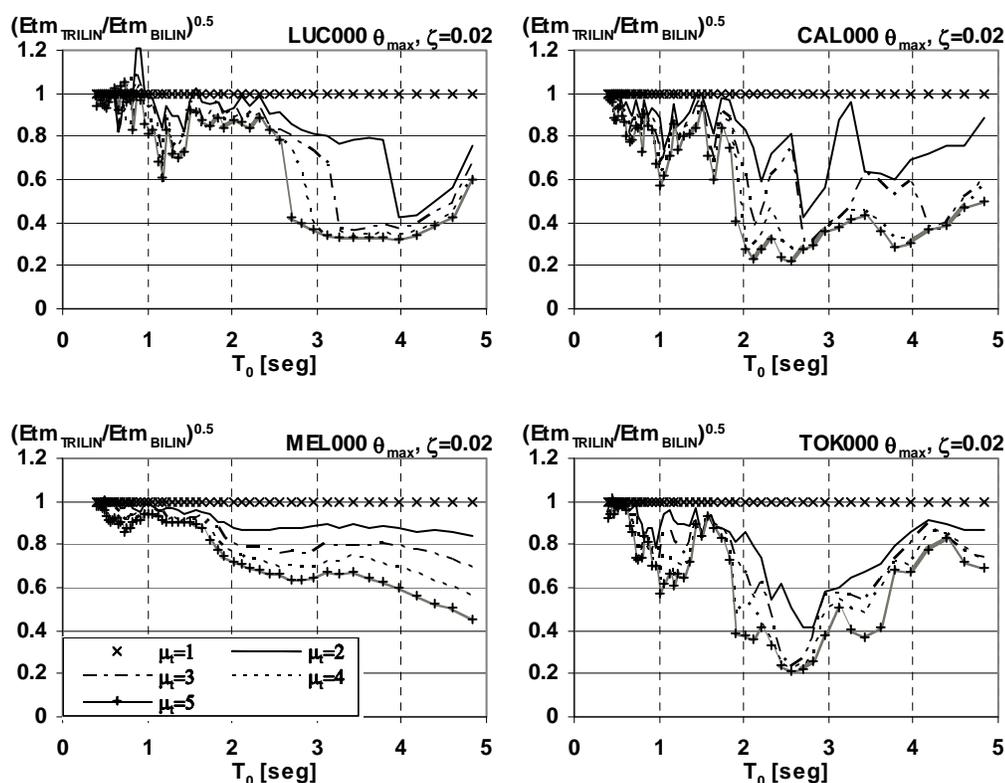
**Figura 3.6** Espectros de Resistencia, Trabajo Monotónico y Energía Total Máxima de Colapso para dos registros utilizados en el estudio.

Al igual que en el análisis de sistemas de múltiples grados de libertad, en el estudio de SUGLT se nota también cierta diferencia entre los resultados de sismos de epicentro lejano y epicentro cercano, aunque no tan evidentes como en múltiples grados de libertad, para sismos de epicentro lejano las diferencias en el coeficiente de colapso tienden a ser mayores.

En la figura 3.7 los espectros de energía total máxima de la izquierda corresponden a registros con epicentro cercano al sitio y los de la derecha a epicentros lejanos, se observa aquí la influencia de la distancia epicentral.

De la figura 3.7 se puede notar la consistencia en resultados entre los dos casos de estudio presentados en el presente trabajo, ya que las diferencias en el coeficiente de fluencia asociado al colapso son menores para sismos con epicentro cercano al sitio de registro especialmente para el coeficiente de estabilidad mínimo, este hecho se cumple también para los sistemas de múltiples grados de libertad. Por otro lado, para los análisis de SUGLT para

el coeficiente de estabilidad máximo se llegan a presentar diferencias grandes en el coeficiente de fluencia de colapso entre sistemas con diferentes ductilidades de transición, aun para sismos de generación cercana, este último hecho es atribuible a que el coeficiente de estabilidad máximo induce al sistema alta inestabilidad por efecto P- $\Delta$  caracterizada por una pendiente negativa grande en la tercera rama del SUGLT.



**Figura 3.7** Espectros de Energía Total Máxima de Colapso para cuatro registros con diferente clasificación utilizados en el estudio.

Por otro lado el efecto de la transición elastoplástica sobre el fenómeno de la inestabilidad dinámica se ve más evidentemente en los sistemas de un grado de libertad trilineales, por lo que debiera estudiarse con detalle una metodología apropiada para representar una estructura de múltiples grados de libertad con un sistema de un grado de libertad.

## **CAPÍTULO 4. CONCLUSIONES Y COMENTARIOS FINALES.**

En el estudio se trató de determinar si el proceso de transición del estado elástico al plástico en estructuras de acero sometidas a análisis dinámicos tiene influencia sobre el factor de seguridad contra inestabilidad dinámica; para ello, se analizaron un conjunto de marcos planos de acero prediseñados conforme a la reglamentación del D.F. y se realizó un análisis dinámico de sistemas de un grado de libertad con comportamiento histerético trilineal, para tratar de establecer qué parámetros son los que influyen sobre el factor de seguridad contra inestabilidad dinámica.

Del trabajo realizado y los resultados presentados se pueden generar las siguientes afirmaciones.

El coeficiente de colapso llega a presentar significativas variaciones según el proceso particular de formación del mecanismo de colapso aún cuando los sistemas tengan iguales características elásticas, cortante último y mecanismo de colapso, especialmente cuando existen problemas de efectos de distancia epicentral grande, por lo que dichas variaciones deben tenerse en cuenta para establecer recomendaciones de diseño o expresiones simplificativas.

De los resultados para marcos planos y SUGLT se puede afirmar que diseños basados en modelos elasto-plásticos bilineales arrojan siempre diseños conservadores en cuanto a la inestabilidad dinámica se refiere, en comparación con sistemas estructurales con transición gradual del estado elástico al plástico. Una medida conservadora del coeficiente de colapso se puede obtener de sistemas de un grado de libertad equivalentes bilineales en términos generales.

Parece razonable realizar estimaciones de seguridad contra colapso por inestabilidad dinámica basadas en las características elásticas, el mecanismo de colapso y la resistencia

basal última para movimientos del terreno cercanos al epicentro del sismo y sin efectos de sitio importantes.

El porcentaje del amortiguamiento crítico no es un parámetro que afecte el factor de seguridad por inestabilidad dinámica, esto para el caso de SUGLT. Debe llevarse a cabo un estudio para marcos planos variando el nivel de amortiguamiento y verificar en su caso la veracidad de la afirmación anterior para el caso de sistemas de múltiples grados de libertad.

Se necesita estudiar con más detalle el grupo de sismos utilizados para determinar con certeza cual es la característica que se relaciona directamente al fenómeno de la inestabilidad dinámica.

De los resultados obtenidos en el presente trabajo se puede afirmar que la transición del estado elástico al plástico de estructuras toma importancia en la variación del factor de seguridad por inestabilidad dinámica, cuanto más crece el periodo y el coeficiente de estabilidad de la estructura (este último relacionado estrechamente con el nivel de carga gravitacional de la estructura).

## REFERENCIAS.

Bernal, D. (1991). "Locating events in step-by-step integration of the equations of motion", Journal of Structural Engineering, ASCE, Vol.117, No.2, pp. 530-545.

Bernal, D (1992), "Instability of buildings subjected to earthquakes", Journal of Structural Engineering, ASCE, v118, 8, pp. 2239-2260.

Bernal, D (1998), "Instability of buildings during seismic response", Engineering Structures, 20, 4-6, pp. 496-502.

Díaz, G. y Sordo, E. (2004) "El Proceso de Formación de Mecanismos en la Seguridad contra Inestabilidad Dinámica" Memorias del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Estructural, Acapulco, Guerrero, México.

Elgamal, A., Ashford, S y Kramer, S. (1998), "1 st PEER Workshop on Characterization of Special Source Effects", Workshop Report, UCSD, Pacific Center for Earthquake Engineering Research, UC Berkeley.

Nakajima, A., H. Abe y S. Kuranishi (1990), "Effect of Multiple Collapse Modes on Dynamic Failure of Structures with Structural Instability", Proc of the Japan Society of Civil Engineers, No 416, pp. 13-23.

Prakash, V., G. H. Powell, S. Campbell (1993). "Drain-2Dx Base Program Description and User Guide." University of California.

Sordo, E. y Bernal, D., (1993), "Influencia del Mecanismo de Falla en la Seguridad contra Colapso Dinámico", Memorias del X Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Puerto Vallarta, México.

Sordo, E. y Bernal, D., (1994), "Dynamic instability in three dimensional structures", Report No. CE-94-14, Civil Engineering Department, Northeastern University, USA, 141 pages.

Sordo, E. y Bernal, D., (1996), "Dynamic instability phenomenon in bidirectional systems", Proceedings of the Eleventh World Conference on Earthquake Engineering, Disc 1, Paper No. 327.

Sordo, E. y Díaz, G. (2003), "Importancia de la Formación Paulatina de Mecanismos en la Seguridad contra Inestabilidad Dinámica" Memorias del XIV Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, León, Guanajuato, México.

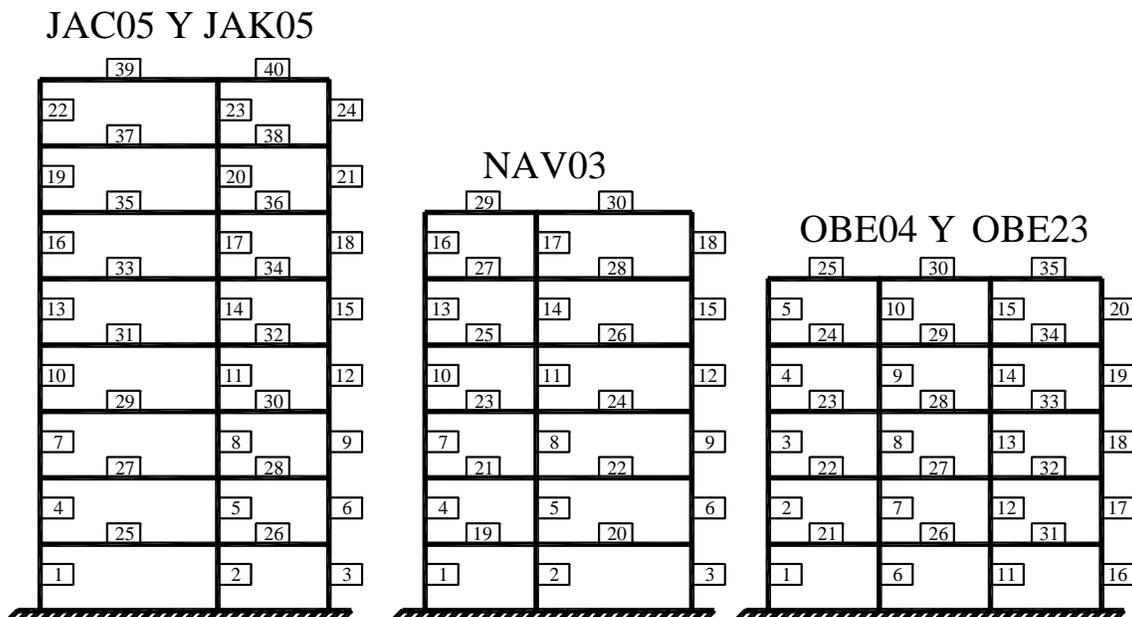
Sordo, E. y Félix, I. (2000), "Efecto de la orientación en la disipación energética de estructuras tridimensionales cercanas al colapso dinámico", Memorias del XII Congreso Nacional de Ingeniería Sísmica, Morelia, México.

## ANEXO I.

El siguiente anexo muestra las características generales de las estructuras utilizadas a lo largo del estudio, geometría, cargas actuantes, propiedades geométricas de los elementos que conforman la estructura, resistencias de los elementos.

### Modelos en estudio.

La numeración de elementos de los diferentes marcos utilizados es la que se muestra en la siguiente figura.



**Figura AI.1** Numeración de los elementos para cada marco de referencia.

Las siguientes tablas muestran para cada elemento de las estructuras, su área, momento de inercia, momento resistente positivo y negativo, carga distribuida (en el caso de vigas) y carga axial debida a elementos horizontales perpendiculares al plano de los marcos (columnas). Para todas las estructuras se considera un módulo de elasticidad de  $2.0E+07$  ton/m<sup>2</sup> y endurecimiento por deformación del 0 % del módulo de elasticidad.

En las siguientes tablas (i) se refiere al momento resistente en el nodo inicial de los elementos (nodo inferior en columnas y nodo izquierdo en vigas), mientras que (f) está referido al nodo final de los elementos (nodo superior en columnas y nodo de la derecha en las vigas). El símbolo (\*) denota momento resistente muy grande ( $9.0E+07$  ton\*m).

## Marco de referencia JAC05.

**Tabla AI.1** Propiedades de los elementos del marco de referencia JAC05.

Elemento.	Área transversal (m <sup>2</sup> )	Momento de inercia (m <sup>4</sup> )	Carga distribuida (ton*m)	Carga axial (ton)
1	0.031484	0.001781	-	9.00
2	0.031484	0.001781	-	17.75
3	0.031484	0.001781	-	8.75
4	0.031484	0.001781	-	9.00
5	0.031484	0.001781	-	17.75
6	0.031484	0.001781	-	8.75
7	0.027871	0.001511	-	9.00
8	0.027871	0.001511	-	17.75
9	0.027871	0.001511	-	8.75
10	0.027871	0.001511	-	9.00
11	0.027871	0.001511	-	17.75
12	0.027871	0.001511	-	8.75
13	0.019226	0.001007	-	9.00
14	0.019226	0.001007	-	17.75
15	0.019226	0.001007	-	8.75
16	0.019226	0.001007	-	9.00
17	0.019226	0.001007	-	17.75
18	0.019226	0.001007	-	8.75
19	0.019226	0.001007	-	9.00
20	0.019226	0.001007	-	17.75
21	0.019226	0.001007	-	8.75
22	0.019226	0.001007	-	9.00
23	0.019226	0.001007	-	17.75
24	0.019226	0.001007	-	8.75
25	0.019226	0.001007	3.75	-
26	0.019226	0.001007	2.50	-
27	0.019226	0.001007	3.75	-
28	0.019226	0.001007	2.50	-
29	0.019226	0.001007	3.75	-
30	0.019226	0.001007	2.50	-
31	0.019226	0.001007	3.75	-
32	0.019226	0.001007	2.50	-
33	0.019226	0.001007	3.75	-
34	0.019226	0.001007	2.50	-
35	0.019226	0.001007	3.75	-
36	0.019226	0.001007	2.50	-
37	0.019226	0.001007	3.75	-
38	0.019226	0.001007	2.50	-
39	0.019226	0.001007	3.75	-
40	0.019226	0.001007	2.50	-

**Tabla AI.2** Momentos resistentes de los submodelos JAC05\_1, JAC05\_2, JAC05\_3, JAC05\_4.

Elemento.	JAC05_1		JAC05_2		JAC05_3		JAC05_4	
	Momento (i) resistente (ton*m)	Momento (f) resistente (ton*m)	Momento (i) resistente (ton*m)	Momento (f) resistente (ton*m)	Momento (i) resistente (ton*m)	Momento (f) resistente (ton*m)	Momento (i) resistente (ton*m)	Momento (f) resistente (ton*m)
1	168.00	*	108.00	*	108.00	*	108.00	*
2	168.00	*	108.00	*	108.00	*	108.00	*
3	168.00	*	108.00	*	108.00	*	108.00	*
4	*	*	*	*	*	*	*	*
5	*	*	*	*	*	*	*	*
6	*	*	*	*	*	*	*	*
7	*	*	*	*	*	*	*	*
8	*	*	*	*	*	*	*	*
9	*	*	*	*	*	*	*	*
10	*	*	*	*	*	*	*	*
11	*	*	*	*	*	*	*	*
12	*	*	*	*	*	*	*	*
13	*	54.00	*	54.00	*	54.00	*	54.00
14	*	104.00	*	54.00	*	54.00	*	54.00
15	*	54.00	*	54.00	*	54.00	*	54.00
16	*	*	*	*	*	*	*	*
17	*	*	*	*	*	*	*	*
18	*	*	*	*	*	*	*	*
19	*	*	*	*	*	*	*	*
20	*	*	*	*	*	*	*	*
21	*	*	*	*	*	*	*	*
22	*	*	*	*	*	*	*	*
23	*	*	*	*	*	*	*	*
24	*	*	*	*	*	*	*	*
25	109.00	109.00	109.00	109.00	109.00	109.00	59.00	59.00
26	159.00	159.00	159.00	159.00	109.00	109.00	109.00	109.00
27	109.00	109.00	119.00	119.00	109.00	109.00	69.00	69.00
28	154.00	154.00	154.00	154.00	104.00	104.00	104.00	104.00
29	104.00	104.00	144.00	144.00	164.00	164.00	194.00	194.00
30	154.00	154.00	214.00	214.00	164.00	164.00	264.00	264.00
31	79.00	79.00	64.00	64.00	134.00	134.00	114.00	114.00
32	104.00	104.00	124.00	124.00	194.00	194.00	174.00	174.00
33	*	*	*	*	*	*	*	*
34	*	*	*	*	*	*	*	*
35	*	*	*	*	*	*	*	*
36	*	*	*	*	*	*	*	*
37	*	*	*	*	*	*	*	*
38	*	*	*	*	*	*	*	*
39	*	*	*	*	*	*	*	*
40	*	*	*	*	*	*	*	*

## Marco de referencia JAK05.

**Tabla AI.3** Propiedades de los elementos del marco de referencia JAK05.

Elemento.	Área transversal (m <sup>2</sup> )	Momento de inercia (m <sup>4</sup> )	Carga distribuida (ton*m)	Carga axial (ton)
1	0.031484	0.001781	-	36.00
2	0.031484	0.001781	-	71.00
3	0.031484	0.001781	-	35.00
4	0.031484	0.001781	-	36.00
5	0.031484	0.001781	-	71.00
6	0.031484	0.001781	-	35.00
7	0.027871	0.001511	-	36.00
8	0.027871	0.001511	-	71.00
9	0.027871	0.001511	-	35.00
10	0.027871	0.001511	-	36.00
11	0.027871	0.001511	-	71.00
12	0.027871	0.001511	-	35.00
13	0.019226	0.001007	-	36.00
14	0.019226	0.001007	-	71.00
15	0.019226	0.001007	-	35.00
16	0.019226	0.001007	-	36.00
17	0.019226	0.001007	-	71.00
18	0.019226	0.001007	-	35.00
19	0.019226	0.001007	-	36.00
20	0.019226	0.001007	-	71.00
21	0.019226	0.001007	-	35.00
22	0.019226	0.001007	-	36.00
23	0.019226	0.001007	-	71.00
24	0.019226	0.001007	-	35.00
25	0.019226	0.001007	3.75	-
26	0.019226	0.001007	2.50	-
27	0.019226	0.001007	3.75	-
28	0.019226	0.001007	2.50	-
29	0.019226	0.001007	3.75	-
30	0.019226	0.001007	2.50	-
31	0.019226	0.001007	3.75	-
32	0.019226	0.001007	2.50	-
33	0.019226	0.001007	3.75	-
34	0.019226	0.001007	2.50	-
35	0.019226	0.001007	3.75	-
36	0.019226	0.001007	2.50	-
37	0.019226	0.001007	3.75	-
38	0.019226	0.001007	2.50	-
39	0.019226	0.001007	3.75	-
40	0.019226	0.001007	2.50	-

**Tabla AI.4** Momentos resistentes de los submodelos JAK05\_1, JAK05\_2, JAK05\_3, JAK05\_4.

Elemento	JAK05_1		JAK05_2		JAK05_3		JAK05_4	
	Momento (i) resistente (ton*m)	Momento (f) resistente (ton*m)	Momento (i) resistente (ton*m)	Momento (f) resistente (ton*m)	Momento (i) resistente (ton*m)	Momento (f) resistente (ton*m)	Momento (i) resistente (ton*m)	Momento (f) resistente (ton*m)
1	168.00	*	108.00	*	108.00	*	108.00	*
2	168.00	*	108.00	*	108.00	*	108.00	*
3	168.00	*	108.00	*	108.00	*	108.00	*
4	*	*	*	*	*	*	*	*
5	*	*	*	*	*	*	*	*
6	*	*	*	*	*	*	*	*
7	*	*	*	*	*	*	*	*
8	*	*	*	*	*	*	*	*
9	*	*	*	*	*	*	*	*
10	*	*	*	*	*	*	*	*
11	*	*	*	*	*	*	*	*
12	*	*	*	*	*	*	*	*
13	*	54.00	*	54.00	*	54.00	*	54.00
14	*	104.00	*	54.00	*	54.00	*	54.00
15	*	54.00	*	54.00	*	54.00	*	54.00
16	*	*	*	*	*	*	*	*
17	*	*	*	*	*	*	*	*
18	*	*	*	*	*	*	*	*
19	*	*	*	*	*	*	*	*
20	*	*	*	*	*	*	*	*
21	*	*	*	*	*	*	*	*
22	*	*	*	*	*	*	*	*
23	*	*	*	*	*	*	*	*
24	*	*	*	*	*	*	*	*
25	109.00	109.00	109.00	109.00	109.00	109.00	59.00	59.00
26	159.00	159.00	159.00	159.00	109.00	109.00	109.00	109.00
27	109.00	109.00	119.00	119.00	109.00	109.00	69.00	69.00
28	154.00	154.00	154.00	154.00	104.00	104.00	104.00	104.00
29	104.00	104.00	144.00	144.00	164.00	164.00	194.00	194.00
30	154.00	154.00	214.00	214.00	164.00	164.00	264.00	264.00
31	79.00	79.00	64.00	64.00	134.00	134.00	114.00	114.00
32	104.00	104.00	124.00	124.00	194.00	194.00	174.00	174.00
33	*	*	*	*	*	*	*	*
34	*	*	*	*	*	*	*	*
35	*	*	*	*	*	*	*	*
36	*	*	*	*	*	*	*	*
37	*	*	*	*	*	*	*	*
38	*	*	*	*	*	*	*	*
39	*	*	*	*	*	*	*	*
40	*	*	*	*	*	*	*	*

### Marco de referencia NAV03.

**Tabla AI.5** Propiedades de los elementos del marco de referencia NAV03.

Elemento.	Área transversal (m <sup>2</sup> )	Momento de inercia (m <sup>4</sup> )	Carga distribuida (ton*m)	Carga axial (ton)
1	0.01007	0.000225	-	6.25
2	0.01007	0.000225	-	12.50
3	0.01007	0.000225	-	6.25
4	0.00948	0.000164	-	6.25
5	0.00948	0.000164	-	12.50
6	0.00948	0.000164	-	6.25
7	0.00761	0.000129	-	6.25
8	0.00761	0.000129	-	12.50
9	0.00761	0.000129	-	6.25
10	0.00761	0.000129	-	6.25
11	0.00761	0.000129	-	12.50
12	0.00761	0.000129	-	6.25
13	0.00494	0.000085	-	6.25
14	0.00494	0.000085	-	12.50
15	0.00494	0.000085	-	6.25
16	0.00494	0.000085	-	6.25
17	0.00494	0.000085	-	12.50
18	0.00494	0.000085	-	6.25
19	0.01007	0.000177	2.50	-
20	0.01007	0.000177	3.21	-
21	0.01007	0.000177	2.50	-
22	0.01007	0.000177	3.21	-
23	0.01007	0.000177	2.50	-
24	0.01007	0.000177	3.21	-
25	0.01007	0.000177	2.50	-
26	0.01007	0.000177	3.21	-
27	0.01007	0.000177	2.50	-
28	0.01007	0.000177	3.21	-
29	0.01007	0.000177	2.50	-
30	0.01007	0.000177	3.21	-

**Tabla AI.6** Momentos resistentes de los submodelos NAV03\_1, NAV03\_2, NAV03\_3, NAV03\_4.

Elemento	NAV03_1		NAV03_2		NAV03_3		NAV03_4	
	Momento (i) resistente (ton*m)	Momento (f) resistente (ton*m)	Momento (i) resistente (ton*m)	Momento (f) resistente (ton*m)	Momento (i) resistente (ton*m)	Momento (f) resistente (ton*m)	Momento (i) resistente (ton*m)	Momento (f) resistente (ton*m)
1	49.86	*	50.86	*	30.86	*	20.86	*
2	55.86	*	52.86	*	34.86	*	25.86	*
3	51.86	*	40.86	*	33.86	*	20.86	*
4	*	*	*	*	*	*	*	*
5	*	*	*	*	*	*	*	*
6	*	*	*	*	*	*	*	*
7	*	20.33	*	23.33	*	15.33	*	15.33
8	*	31.83	*	33.33	*	19.33	*	16.33
9	*	25.33	*	25.33	*	19.33	*	19.33
10	*	*	*	*	*	*	*	*
11	*	*	*	*	*	*	*	*
12	*	*	*	*	*	*	*	*
13	*	*	*	*	*	*	*	*
14	*	*	*	*	*	*	*	*
15	*	*	*	*	*	*	*	*
16	*	*	*	*	*	*	*	*
17	*	*	*	*	*	*	*	*
18	*	*	*	*	*	*	*	*
19	39.77	47.27	41.77	49.77	62.77	62.77	63.77	63.77
20	18.77	46.77	23.77	43.77	39.77	39.77	44.77	44.77
21	40.77	47.77	44.77	50.77	54.77	54.77	60.77	60.77
22	20.27	48.27	29.27	34.27	38.27	38.27	43.77	43.77
23	*	*	*	*	*	*	*	*
24	*	*	*	*	*	*	*	*
25	*	*	*	*	*	*	*	*
26	*	*	*	*	*	*	*	*
27	*	*	*	*	*	*	*	*
28	*	*	*	*	*	*	*	*
29	*	*	*	*	*	*	*	*
30	*	*	*	*	*	*	*	*

**Marco de referencia OBE04.**

**Tabla AI.7** Propiedades de los elementos del marco de referencia OBE04.

Elemento.	Área transversal (m <sup>2</sup> )	Momento de inercia (m <sup>4</sup> )	Carga distribuida (ton*m)	Carga axial (ton)
1	0.01450	0.000370	-	6.25
2	0.01450	0.000370	-	6.25
3	0.01450	0.000370	-	6.25
4	0.00948	0.000274	-	6.25
5	0.00813	0.000178	-	6.25
6	0.01878	0.001660	-	8.10
7	0.01181	0.000553	-	8.10
8	0.00948	0.000332	-	8.10
9	0.00645	0.000141	-	8.10
10	0.00813	0.000178	-	8.10
11	0.01445	0.000874	-	8.10
12	0.01136	0.000409	-	8.10
13	0.01045	0.000370	-	8.10
14	0.00665	0.000212	-	8.10
15	0.00813	0.000178	-	8.10
16	0.01045	0.000370	-	6.25
17	0.01045	0.000370	-	6.25
18	0.01045	0.000370	-	6.25
19	0.00948	0.000274	-	6.25
20	0.00813	0.000178	-	6.25
21	0.00948	0.000332	3.43	-
22	0.01045	0.000370	3.43	-
23	0.00948	0.000332	3.43	-
24	0.00813	0.000178	3.43	-
25	0.00761	0.000129	3.43	-
26	0.01045	0.000370	3.43	-
27	0.01045	0.000370	3.43	-
28	0.00948	0.000274	3.43	-
29	0.00813	0.000178	3.43	-
30	0.00742	0.000086	3.43	-
31	0.01045	0.000370	3.43	-
32	0.01045	0.000370	3.43	-
33	0.00948	0.000274	3.43	-
34	0.00813	0.000178	3.43	-
35	0.00723	0.000160	3.43	-

**Tabla AI.8** Momentos resistentes de los submodelos OBE04\_1, OBE04\_2, OBE04\_3, OBE04\_4.

Elemento	OBE04_1		OBE04_2		OBE04_3		OBE04_4	
	Momento (i) resistente (ton*m)	Momento (f) resistente (ton*m)	Momento (i) resistente (ton*m)	Momento (f) resistente (ton*m)	Momento (i) resistente (ton*m)	Momento (f) resistente (ton*m)	Momento (i) resistente (ton*m)	Momento (f) resistente (ton*m)
1	33.28	*	33.28	*	36.28	*	42.28	*
2	*	*	*	*	*	*	*	*
3	*	*	*	*	*	*	*	*
4	*	18.61	*	12.61	*	9.61	*	9.61
5	*	*	*	*	*	*	*	*
6	152.98	*	152.98	*	155.98	*	155.98	*
7	53.41	52.11	59.41	52.11	65.41	52.11	71.41	52.11
8	36.75	44.42	45.75	44.42	48.75	44.42	48.75	44.42
9	21.12	19.72	21.12	19.72	15.12	19.72	12.12	19.72
10	*	*	*	*	*	*	*	*
11	86.29	*	88.29	*	97.29	*	103.86	*
12	50.21	50.21	50.21	50.21	50.21	50.21	50.21	50.21
13	41.23	37.79	32.23	37.79	23.23	37.79	14.23	37.79
14	24.16	28.16	18.16	28.16	9.16	28.16	9.16	28.16
15	*	*	*	*	*	*	*	*
16	35.81	*	25.81	*	19.81	*	13.81	*
17	*	*	*	*	*	*	*	*
18	*	*	*	*	*	*	*	*
19	*	17.24	*	20.24	*	20.24	*	17.24
20	*	*	*	*	*	*	*	*
21	37.28	45.38	46.28	45.38	43.28	45.38	46.28	45.38
22	49.08	*	58.08	*	61.08	*	61.08	*
23	35.98	*	26.98	*	20.98	*	14.98	*
24	*	*	*	*	*	*	*	*
25	*	*	*	*	*	*	*	*
26	44.98	43.48	44.98	43.48	48.98	43.48	54.98	43.48
27	*	*	*	*	*	*	*	*
28	*	*	*	*	*	*	*	*
29	*	*	*	*	*	*	*	*
30	*	*	*	*	*	*	*	*
31	36.88	45.98	42.88	45.98	58.88	45.98	64.88	45.98
32	*	48.78	*	42.78	*	39.78	*	36.78
33	*	40.20	*	49.20	*	55.20	*	55.20
34	*	*	*	*	*	*	*	*
35	*	*	*	*	*	*	*	*

## Marco de referencia OBE23.

**Tabla AI.9** Propiedades de los elementos del marco de referencia OBE23.

Elemento.	Área transversal (m <sup>2</sup> )	Momento de inercia (m <sup>4</sup> )	Carga distribuida (ton*m)	Carga axial (ton)
1	0.00645	0.000141	-	6.25
2	0.00645	0.000141	-	6.25
3	0.00645	0.000141	-	6.25
4	0.00285	0.000026	-	6.25
5	0.00285	0.000026	-	6.25
6	0.00645	0.000141	-	8.10
7	0.00645	0.000141	-	8.10
8	0.00645	0.000141	-	8.10
9	0.00285	0.000026	-	8.10
10	0.00285	0.000026	-	8.10
11	0.00645	0.000141	-	8.10
12	0.00645	0.000141	-	8.10
13	0.00645	0.000141	-	8.10
14	0.00285	0.000026	-	8.10
15	0.00285	0.000026	-	8.10
16	0.00645	0.000141	-	6.25
17	0.00645	0.000141	-	6.25
18	0.00645	0.000141	-	6.25
19	0.00285	0.000026	-	6.25
20	0.00285	0.000026	-	6.25
21	0.00491	0.000059	3.43	-
22	0.00491	0.000059	3.43	-
23	0.00491	0.000059	3.43	-
24	0.00397	0.000031	3.43	-
25	0.00397	0.000031	3.43	-
26	0.00491	0.000059	3.43	-
27	0.00491	0.000059	3.43	-
28	0.00491	0.000059	3.43	-
29	0.00397	0.000031	3.43	-
30	0.00397	0.000031	3.43	-
31	0.00491	0.000059	3.43	-
32	0.00491	0.000059	3.43	-
33	0.00491	0.000059	3.43	-
34	0.00397	0.000031	3.43	-
35	0.00397	0.000031	3.43	-

**Tabla AI.10** Momentos resistentes de los submodelos OBE23\_1, OBE23\_2, OBE23\_3, OBE23\_4.

Elemento.	OBE23_1		OBE23_2		OBE23_3		OBE23_4	
	Momento (i) resistente (ton*m)	Momento (f) resistente (ton*m)	Momento (i) resistente (ton*m)	Momento (f) resistente (ton*m)	Momento (i) resistente (ton*m)	Momento (f) resistente (ton*m)	Momento (i) resistente (ton*m)	Momento (f) resistente (ton*m)
1	*	*	*	*	*	*	*	*
2	*	*	*	*	*	*	*	*
3	*	*	*	*	*	*	*	*
4	5.15	5.92	4.60	7.80	7.15	3.80	7.15	3.20
5	*	*	*	*	*	*	*	*
6	*	*	*	*	*	*	*	*
7	*	*	*	*	*	*	*	*
8	*	*	*	*	*	*	*	*
9	7.35	5.95	6.95	5.90	9.95	3.98	9.95	3.58
10	*	*	*	*	*	*	*	*
11	*	*	*	*	*	*	*	*
12	*	*	*	*	*	*	*	*
13	*	*	*	*	*	*	*	*
14	7.87	9.59	11.50	6.20	12.37	5.50	15.37	4.10
15	*	*	*	*	*	*	*	*
16	*	*	*	*	*	*	*	*
17	*	*	*	*	*	*	*	*
18	*	*	*	*	*	*	*	*
19	5.82	4.75	4.70	4.75	3.90	5.75	3.30	5.75
20	*	*	*	*	*	*	*	*
21	*	*	*	*	*	*	*	*
22	*	*	*	*	*	*	*	*
23	*	*	*	*	*	*	*	*
24	*	*	*	*	*	*	*	*
25	*	*	*	*	*	*	*	*
26	*	*	*	*	*	*	*	*
27	*	*	*	*	*	*	*	*
28	*	*	*	*	*	*	*	*
29	*	*	*	*	*	*	*	*
30	*	*	*	*	*	*	*	*
31	*	*	*	*	*	*	*	*
32	*	*	*	*	*	*	*	*
33	*	*	*	*	*	*	*	*
34	*	*	*	*	*	*	*	*
35	*	*	*	*	*	*	*	*

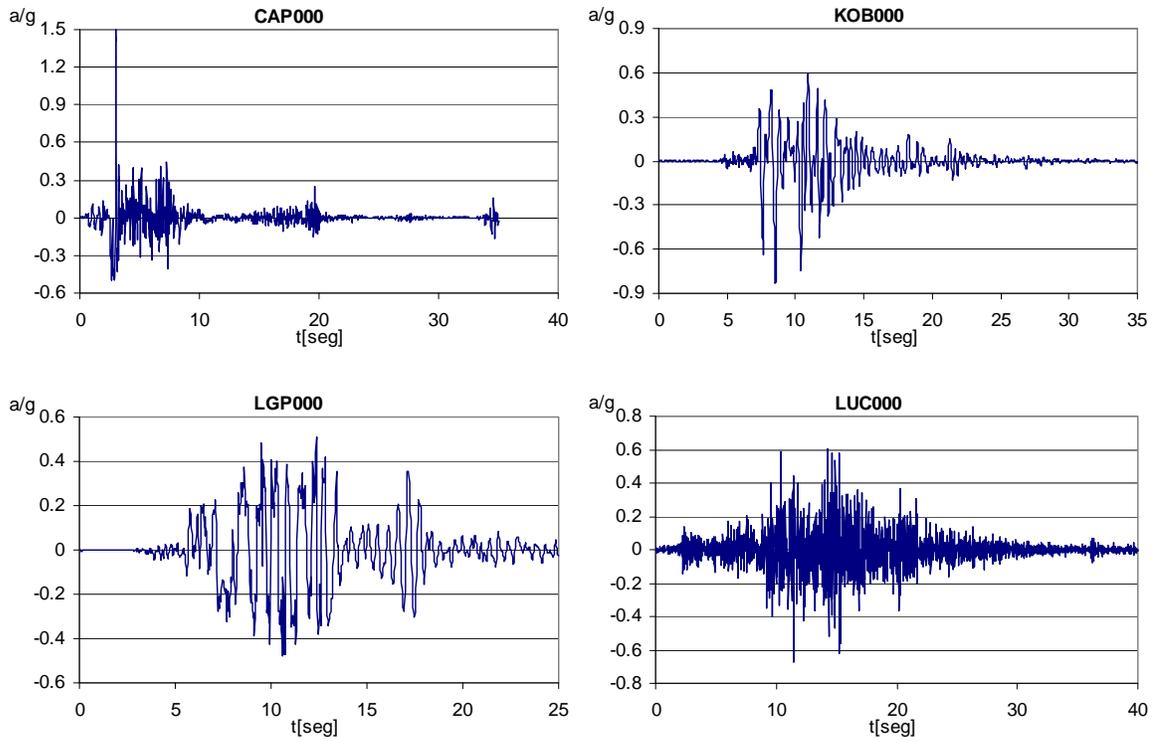
## ANEXO II

Se muestran las características principales de los registros de los sismos estudiados en el presente trabajo y sus acelerogramas.

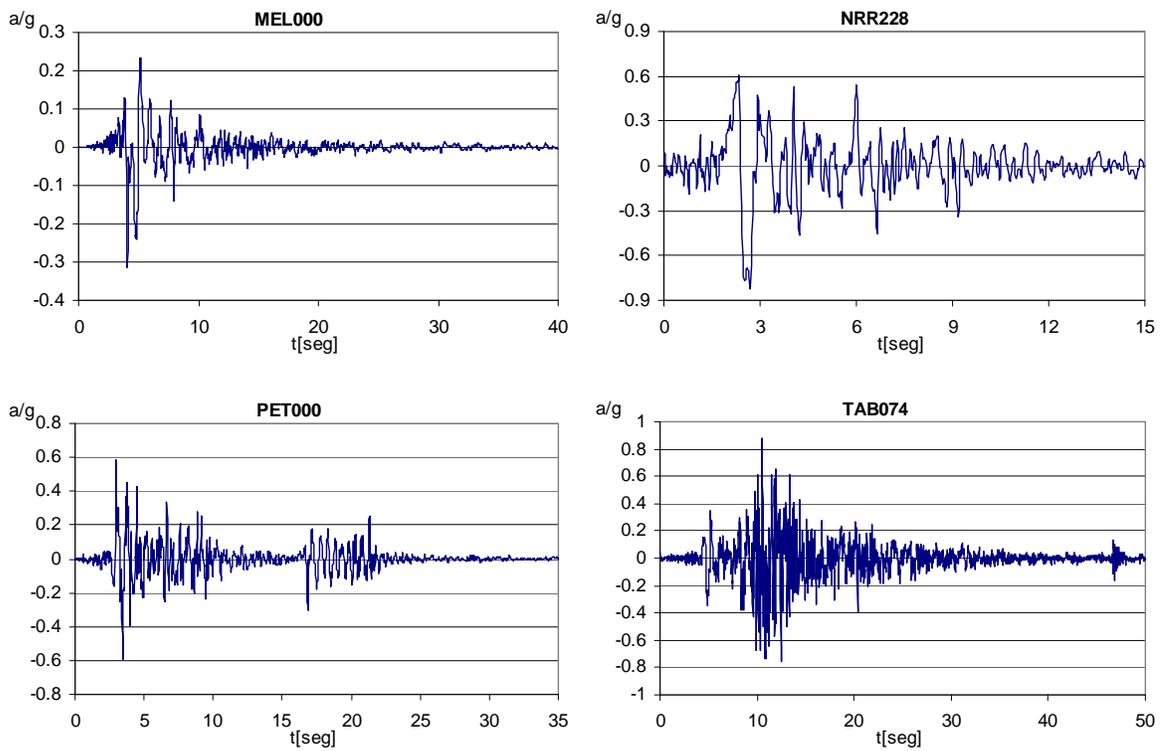
**Tabla AII.1** Parámetros asociados a los registros en estudio.

Registro	Epicentro	Tipo de Suelo	Aceleración máxima (g)	Velocidad máxima (m/s <sup>2</sup> )	Bracketed Duration (seg). (0.05g)	Intensidad de Arias (m/s <sup>2</sup> )
<b>CAP000</b>	Cercano	Firme	1.497	1.310	34.200	6.019
<b>KOB000</b>	Cercano	Firme	0.834	0.921	21.880	8.378
<b>LGP000</b>	Cercano	Firme	0.510	0.962	18.620	7.899
<b>LUC000</b>	Cercano	Firme	0.671	0.359	34.060	6.970
<b>MEL000</b>	Cercano	Blando	0.316	0.697	10.820	0.868
<b>NRR228</b>	Cercano	Blando	0.826	1.740	14.840	7.408
<b>PET000</b>	Cercano	Blando	0.589	0.464	20.160	3.411
<b>TAB074</b>	Cercano	Blando	0.880	0.983	44.600	12.157
<b>CAL000</b>	Lejano	Firme	0.141	0.166	30.640	0.633
<b>OCT180</b>	Lejano	Firme	0.049	0.070	-	0.059
<b>OFU041</b>	Lejano	Firme	0.211	0.130	9.720	0.375
<b>VAL070</b>	Lejano	Firme	0.168	0.150	37.180	1.112
<b>LLO010</b>	Lejano	Blando	0.658	0.414	79.160	15.170
<b>SAB182</b>	Lejano	Blando	0.068	0.079	14.840	0.205
<b>TAC180</b>	Lejano	Blando	0.035	0.114	-	0.056
<b>TOK000</b>	Lejano	Blando	0.318	0.427	70.380	1.580
<b>CEN000</b>	Lejano	Firme	0.349	0.381	29.300	1.817
<b>TAF021</b>	Lejano	Firme	0.156	0.182	19.580	0.543
<b>SCT090</b>	Lejano	Blando	0.168	0.595	33.120	2.352
<b>CDA000</b>	Lejano	Blando	0.082	0.417	23.300	1.070

La tabla anterior muestra algunos parámetros asociados a los registros utilizados en el estudio, la intensidad de Arias se obtiene de la duración total del registro, el parámetro *bracketed duration* mide el tiempo transcurrido entre la primera y última incursión a un cierto nivel de aceleración en cada registro, en este caso 0.05g, en los casos donde no se presenta valor de este parámetro se debe a que no se alcanza en el registro el nivel de aceleraciones mencionado. Todos los registros tienen un intervalo de tiempo entre dato y dato de 0.02 segundos.



**Figura AII.1** Registros de epicentro cercano roca (CR).



**Figura AII.2** Registros de epicentro cercano suelo (CS).

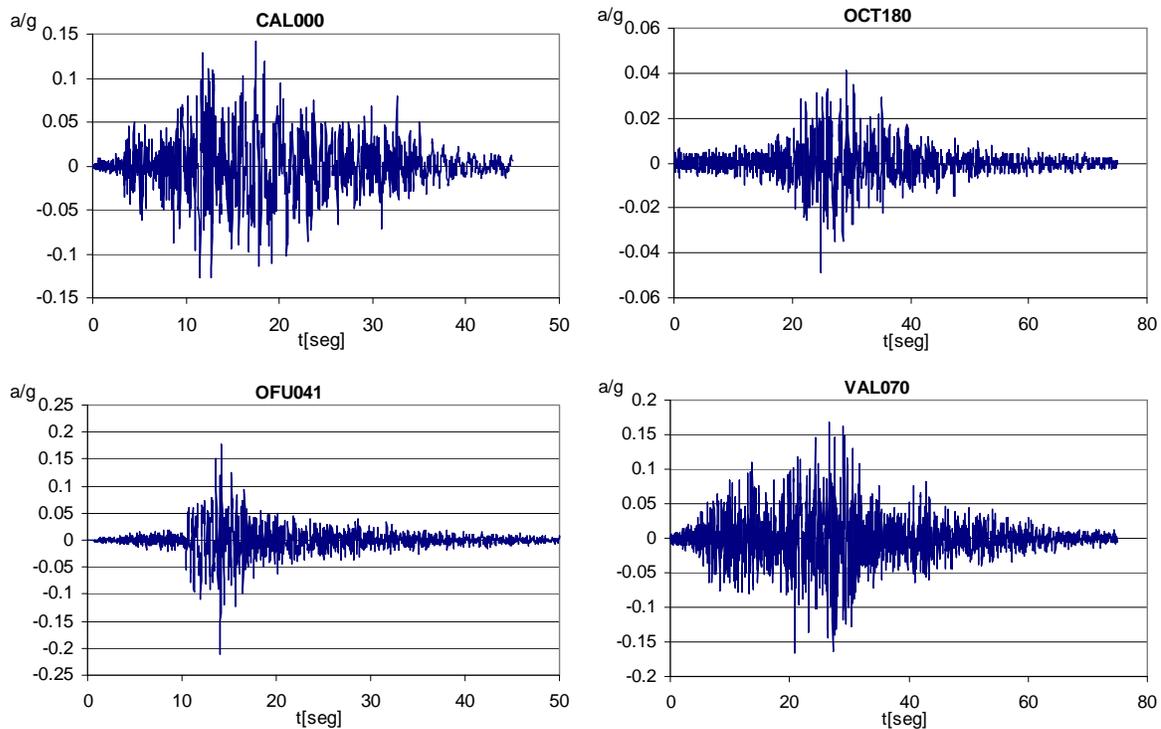


Figura AII.3 Registros de epicentro lejano roca (LR).

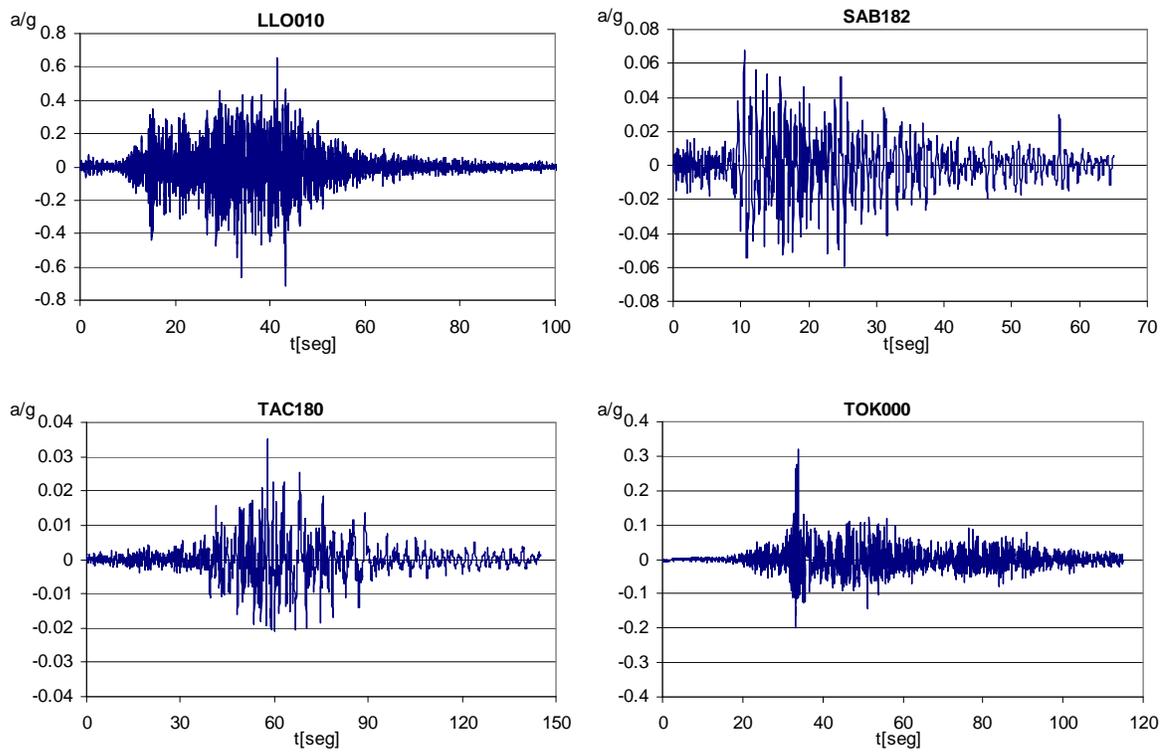
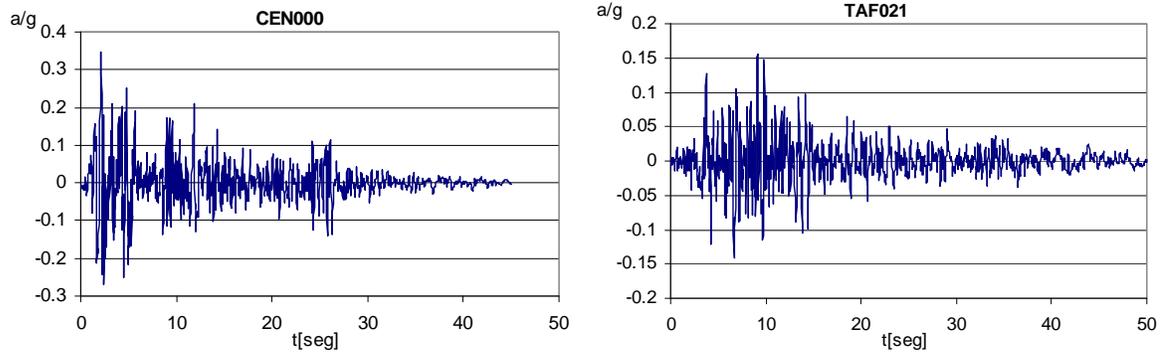
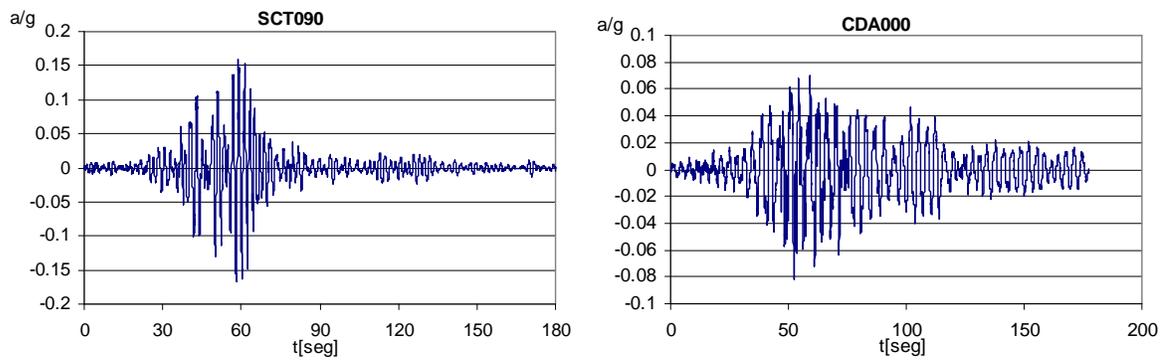


Figura AII.4 Registros de epicentro lejano suelo (LS).



**Figura AII.5** Registros clasificables en tipo LR.



**Figura AII.6** Registros clasificables en tipo LS.

### ANEXO III

Se muestran espectros del cortante de fluencia ( $ct_I$ ) mínimo necesario para alcanzar el desplazamiento de colapso ( $\delta_c$ ) para diferentes valores de ductilidad de transición ( $\mu_t$ ) en sistemas trilineales como el indicado en la figura 3.2. Las gráficas se presentan normalizadas al valor correspondiente a una transición repentina (sistema bilineal con  $\mu_t=1$ ). Los espectros se agrupan de acuerdo al tipo de suelo de donde es tomado el registro, porcentaje del amortiguamiento crítico ( $\xi$ ) y coeficiente de estabilidad ( $\theta$ ). Los subíndices BILIN y TRILIN significan bilineal y trilineal respectivamente.

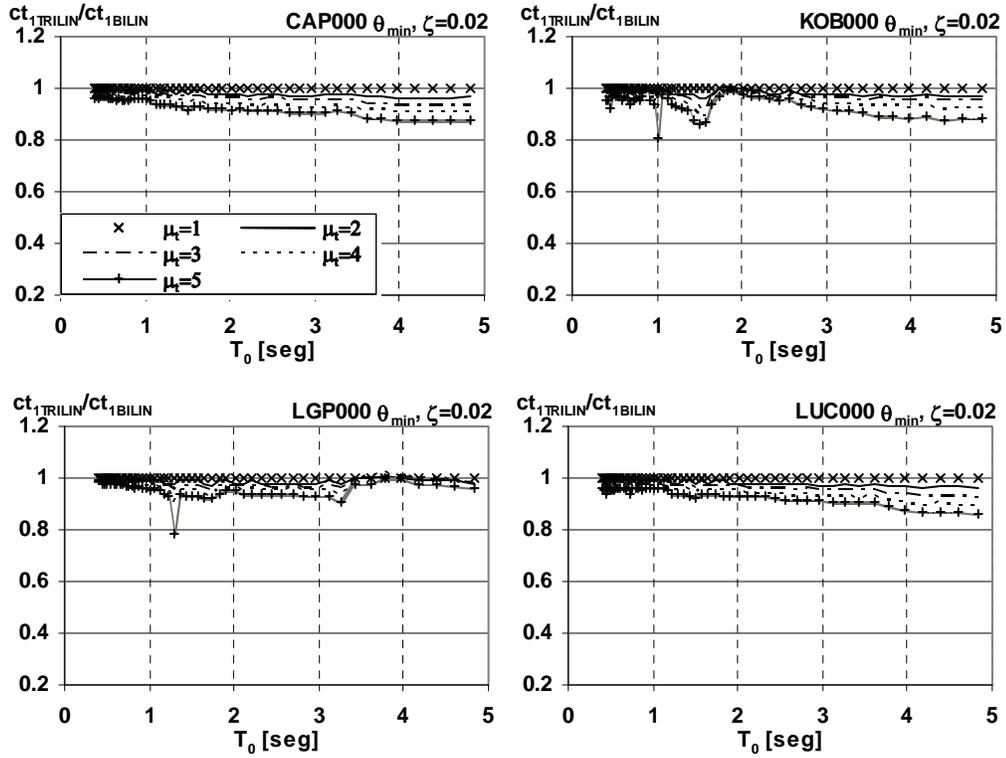


Figura AIII.1a Resistencia de colapso. Epicentro cercano, roca (CR),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{min}$ .

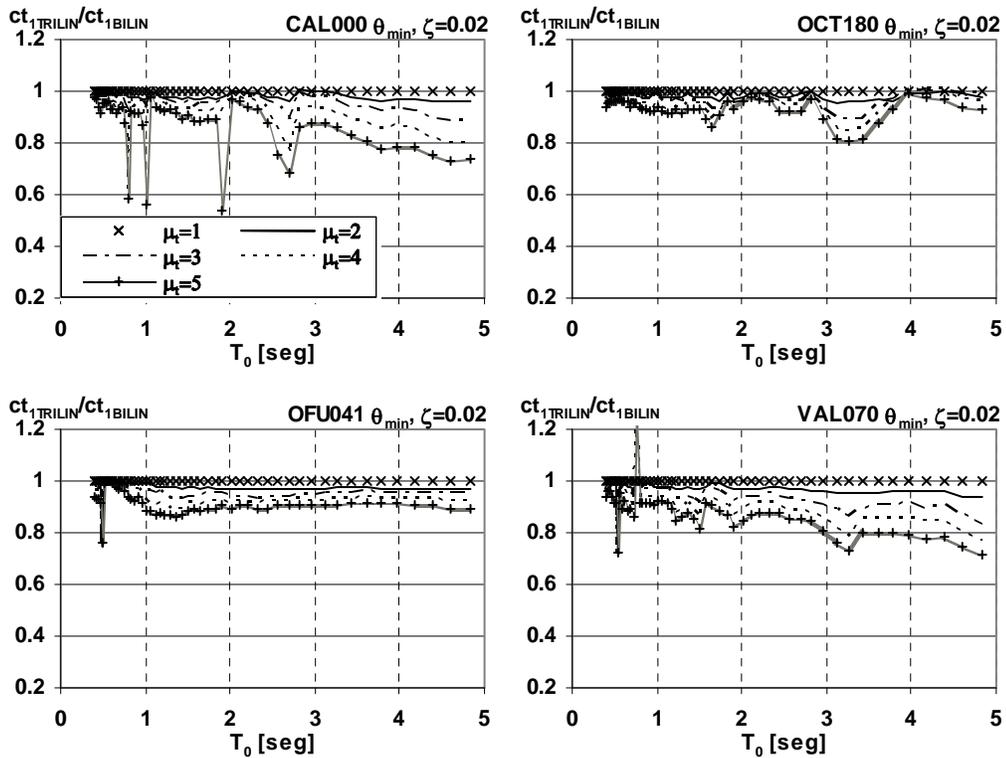


Figura AIII.1b Resistencia de colapso. Epicentro lejano, roca (CR),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{min}$ .

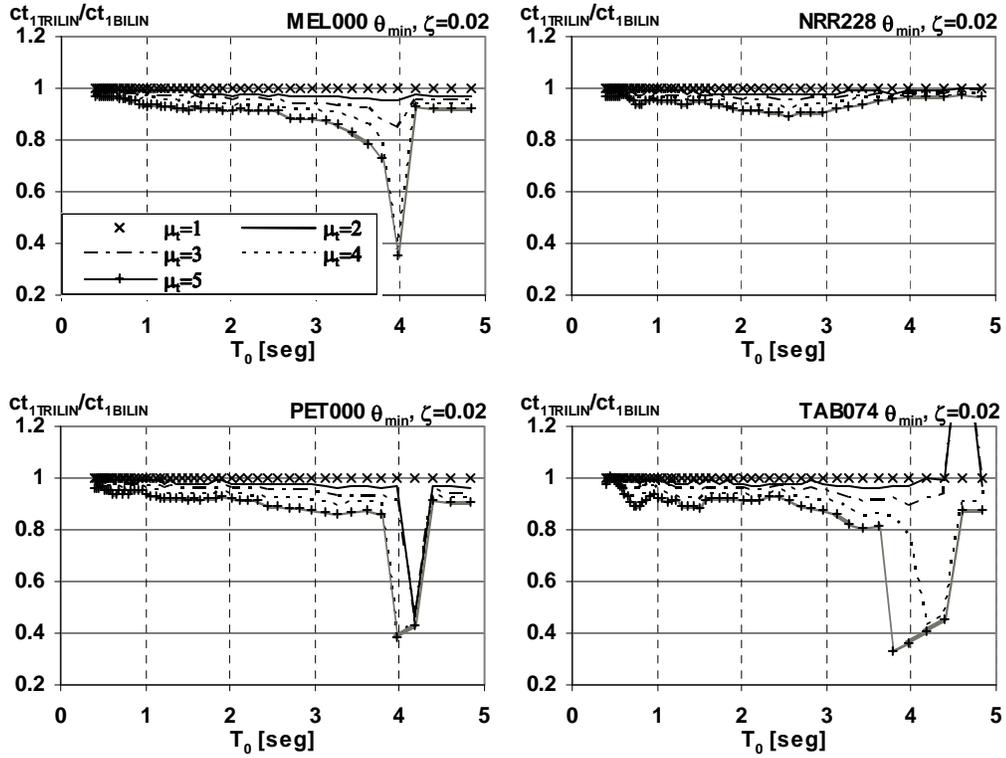


Figura AIII.1c Resistencia de colapso. Epicentro cercano, suelo (CS),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{min}$ .

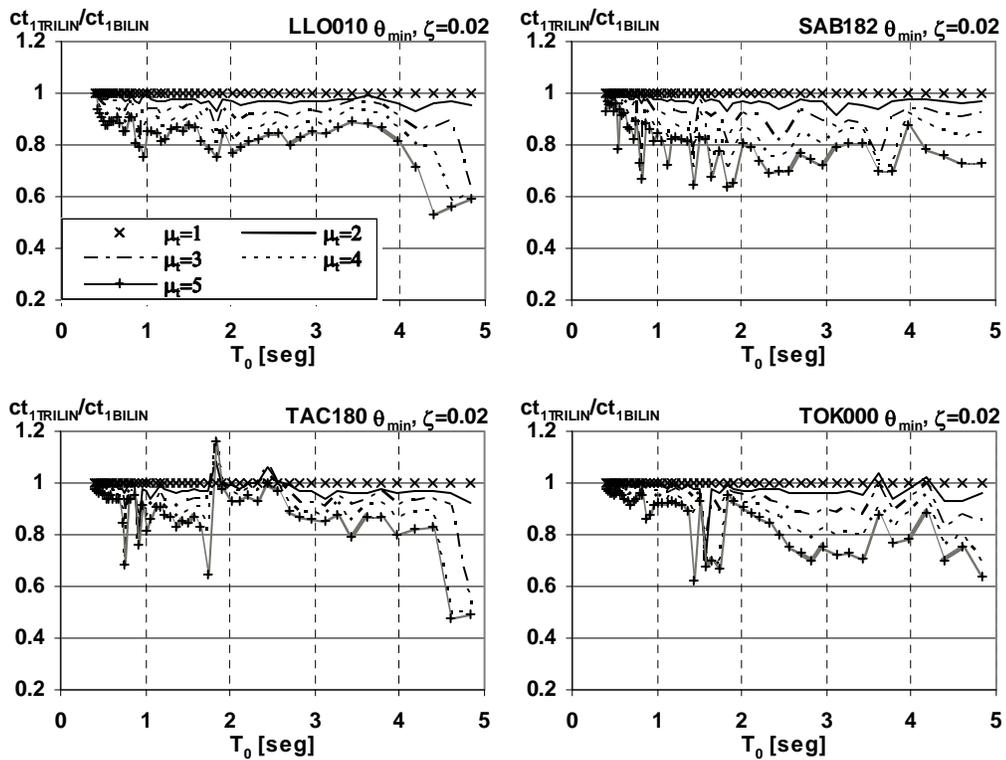
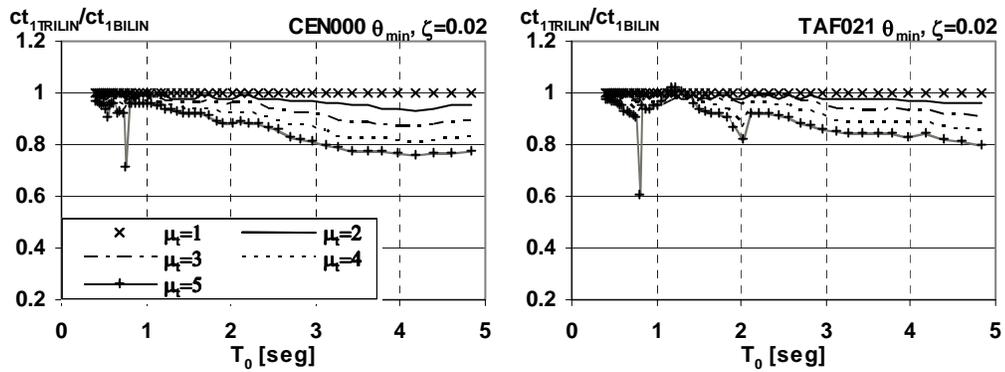
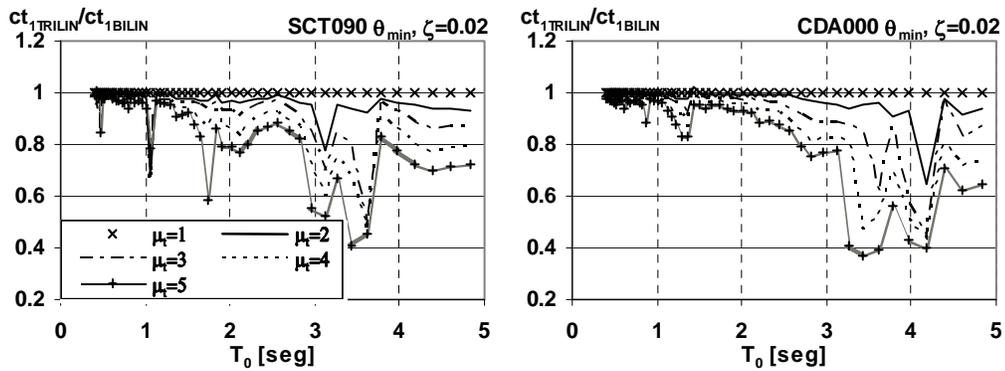


Figura AIII.1d Resistencia de colapso. Epicentro lejano, suelo (LS),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{min}$ .



**Figura AIII.1e** Resistencia de colapso. Registros CEN000 y TAF021 (clasificables en tipo LR),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{min}$ .



**Figura AIII.1f** Resistencia de colapso. Registros SCT090 y CDA000 (clasificables en tipo LS),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{min}$ .

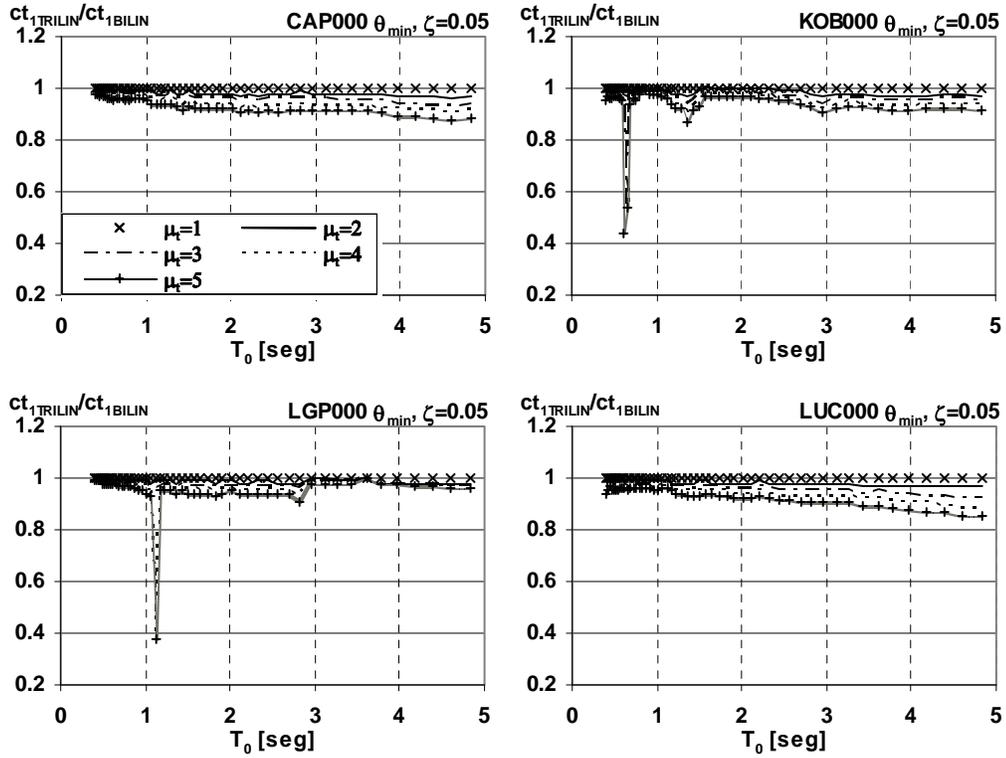


Figura AIII.2a Resistencia de colapso. Epicentro cercano, roca (CR),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{min}$ .

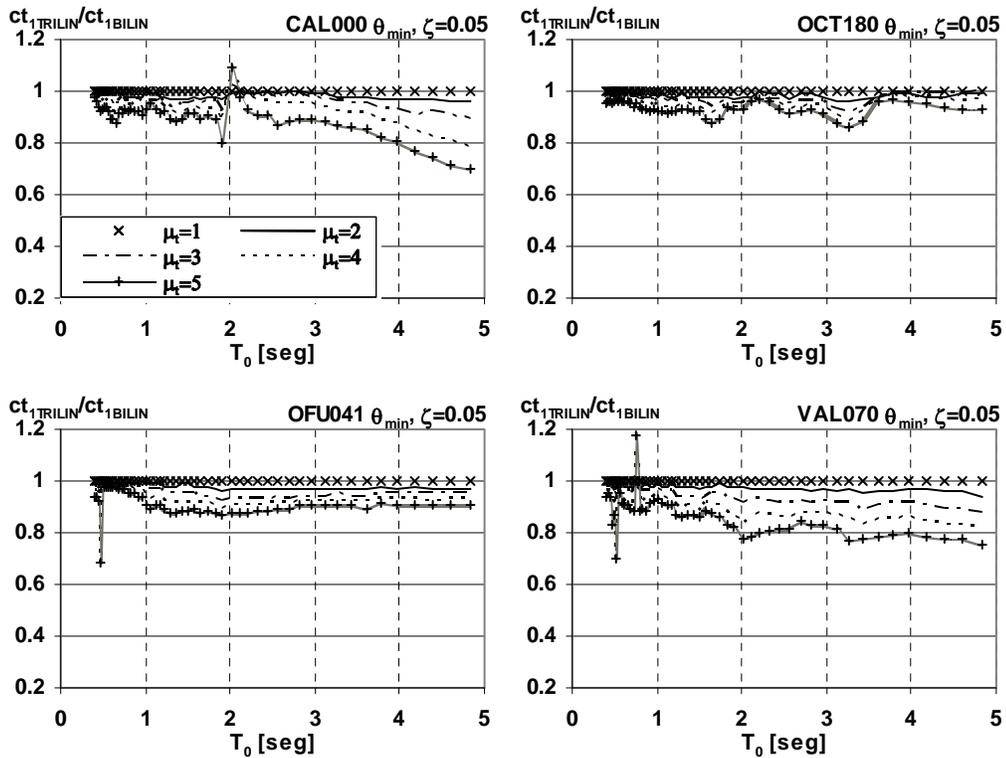


Figura AIII.2b Resistencia de colapso. Epicentro lejano, roca (LR),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{min}$ .

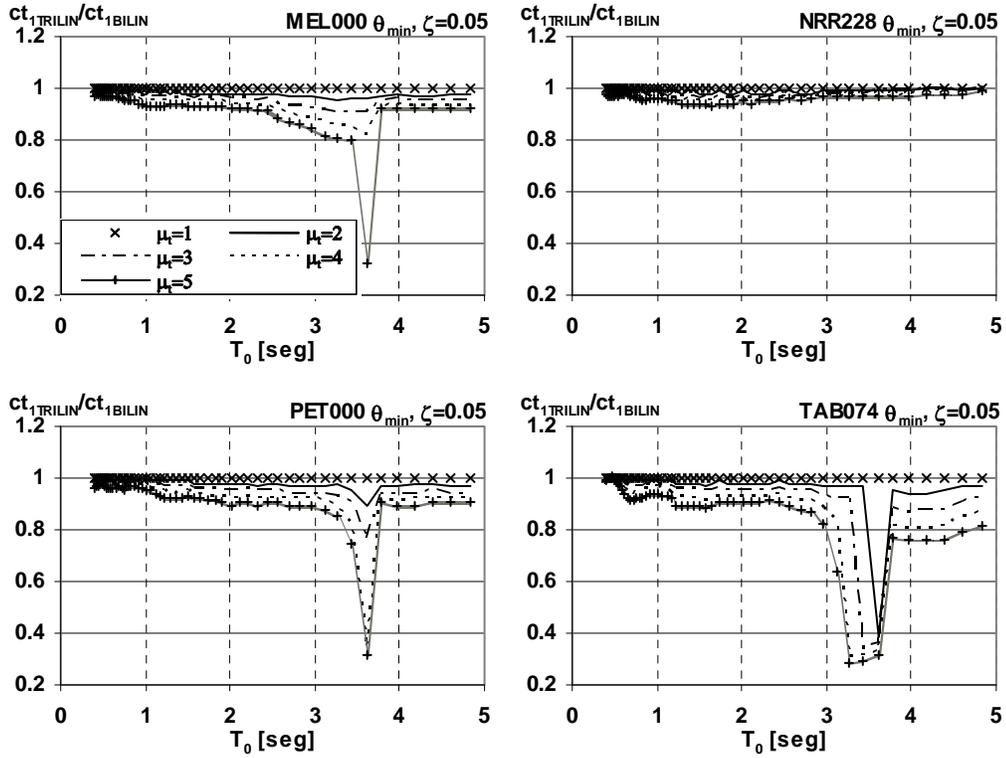


Figura AIII.2c Resistencia de colapso. Epicentro cercano, suelo (CS),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{min}$ .

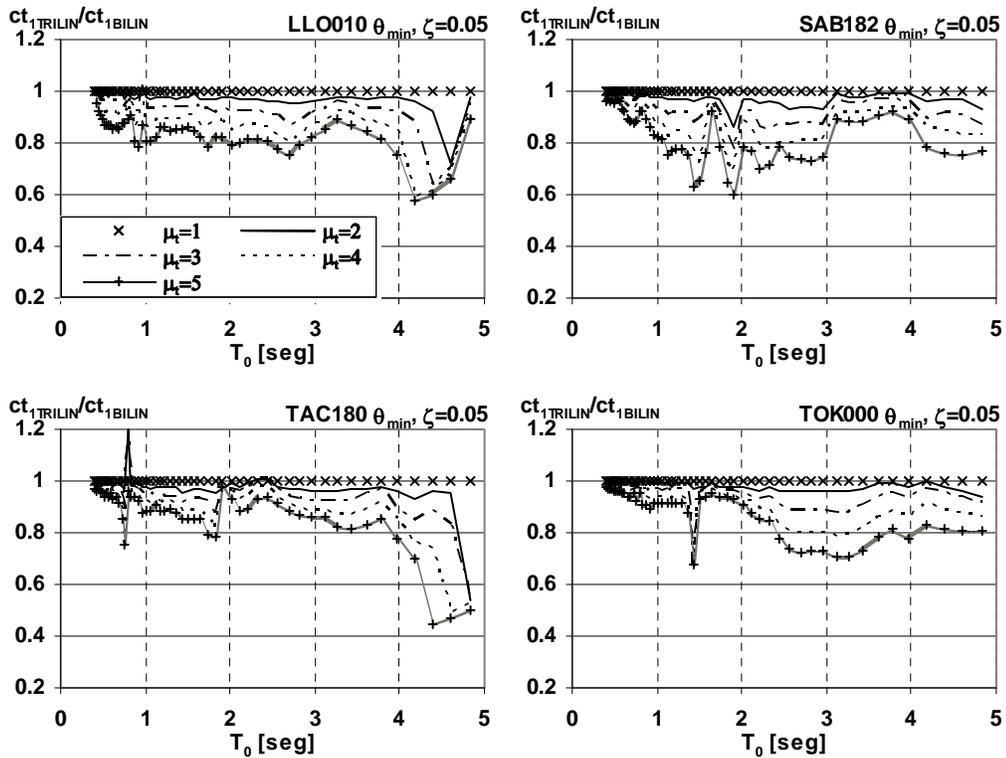
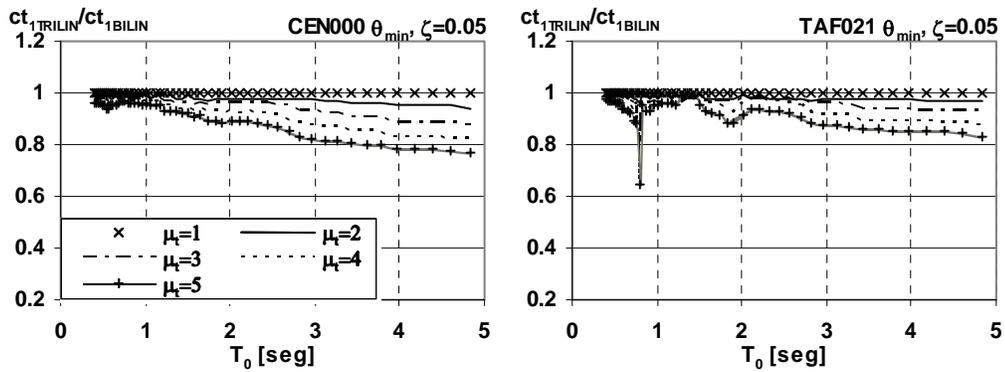
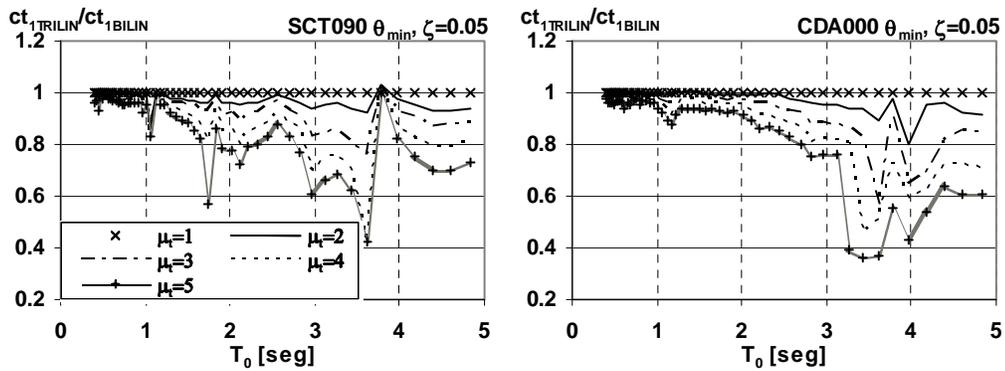


Figura AIII.2d Resistencia de colapso. Epicentro lejano, suelo (LS),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{min}$ .



**Figura AIII.2e** Resistencia de colapso. Registros CEN000 y TAF021 (clasificables en tipo LR),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{\min}$ .



**Figura AIII.2f** Resistencia de colapso. Registros SCT090 y CDA000 (clasificables en tipo LS),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{\min}$ .

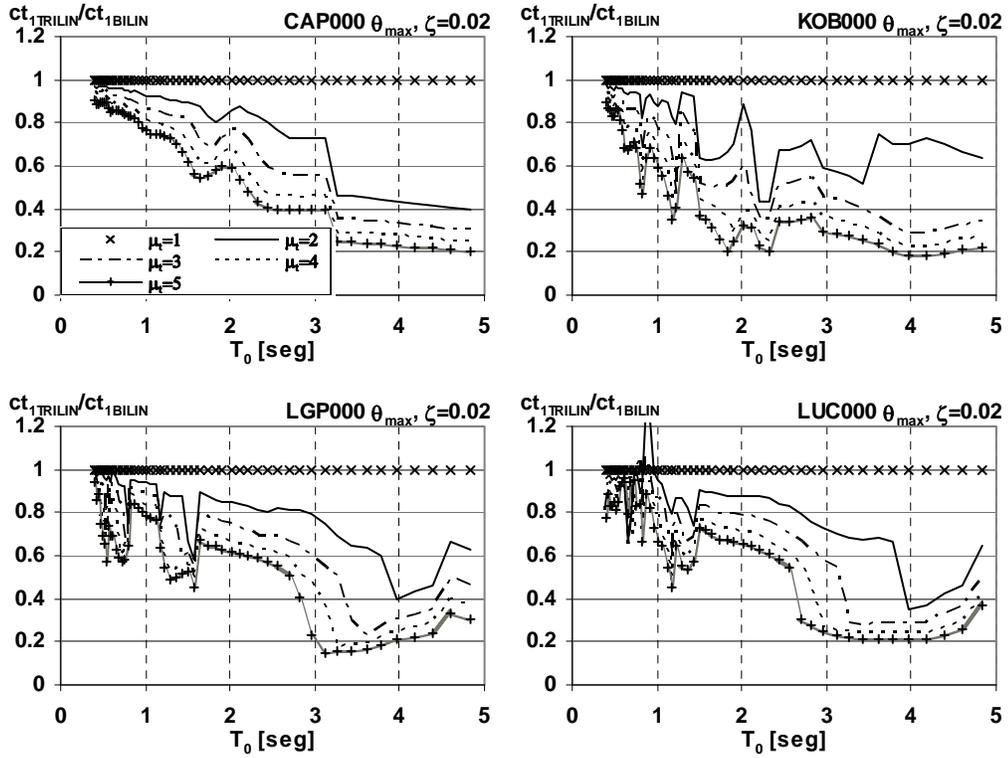


Figura AIII.3a Resistencia de colapso. Epicentro cercano, roca (CR),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{max}$ .

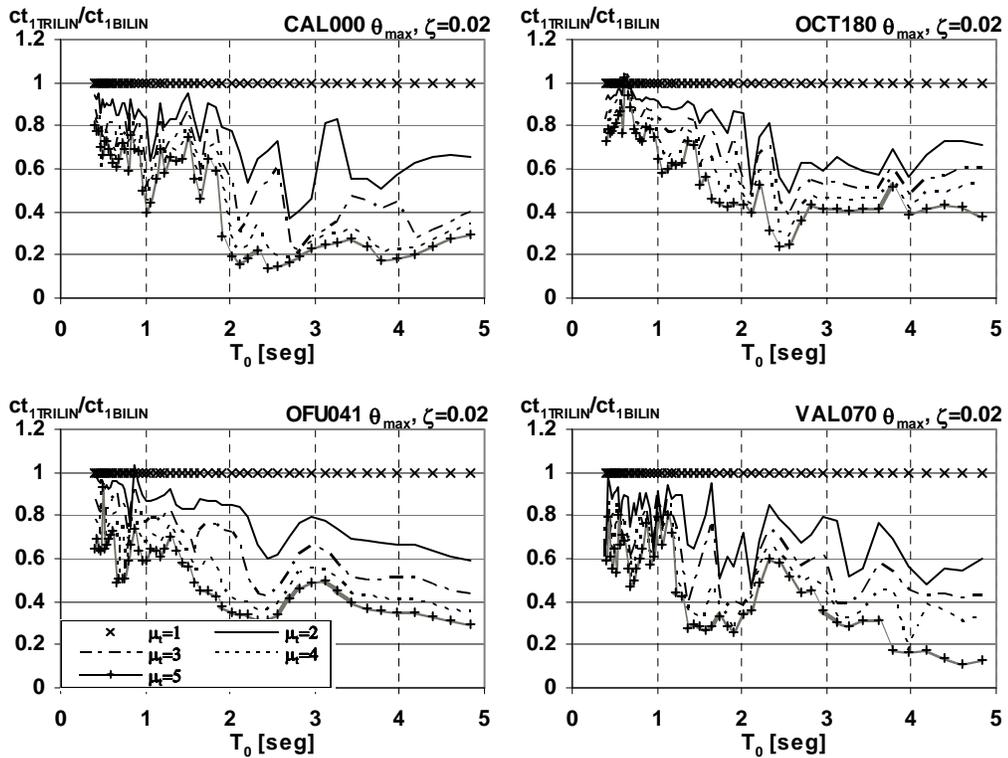


Figura AIII.3b Resistencia de colapso. Epicentro lejano, roca (LR),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{max}$ .

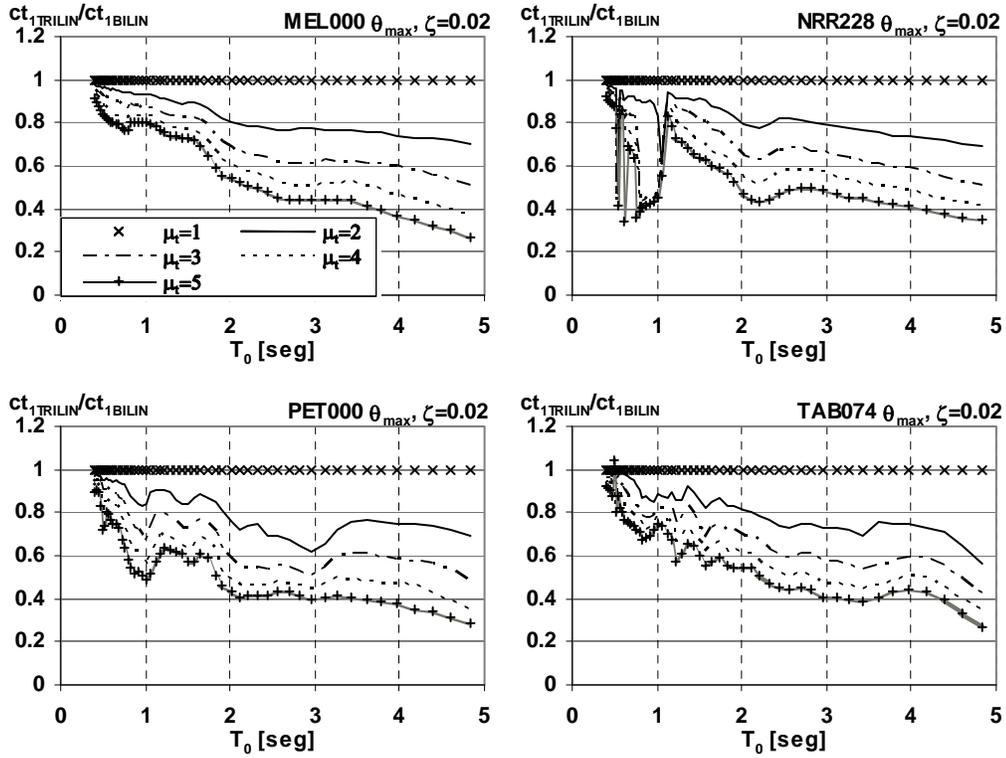


Figura AIII.3c Resistencia de colapso. Epicentro cercano, suelo (CS),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{max}$ .

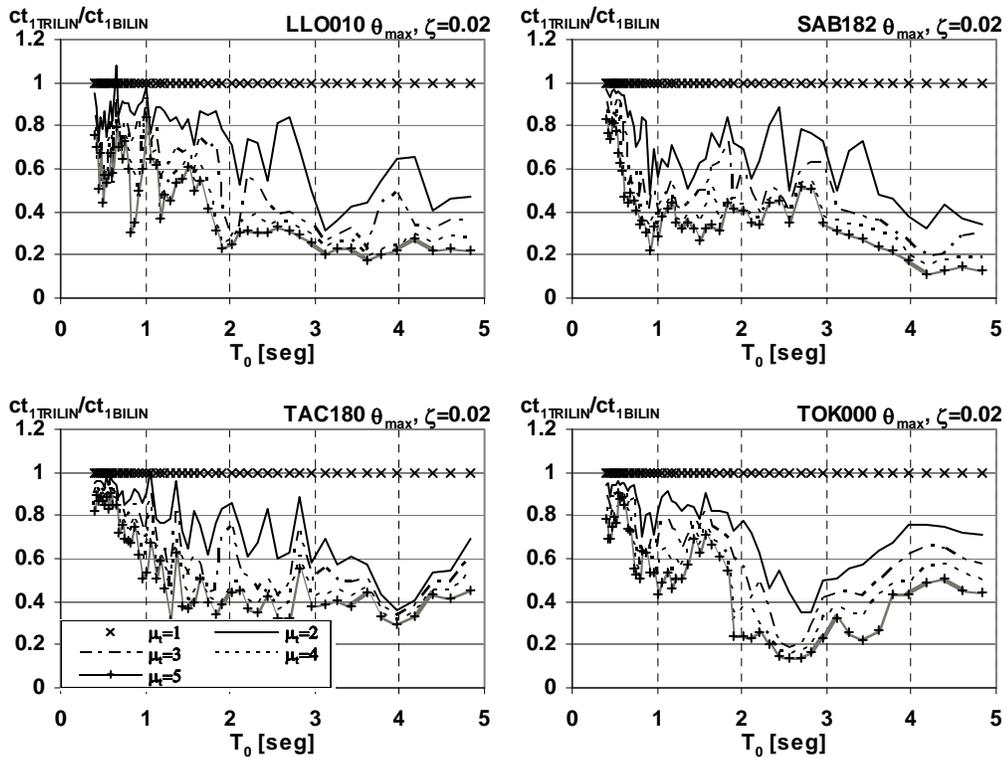
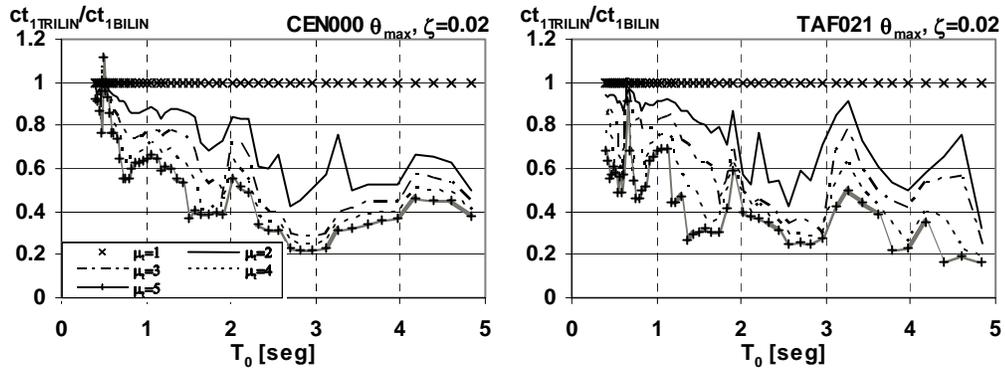
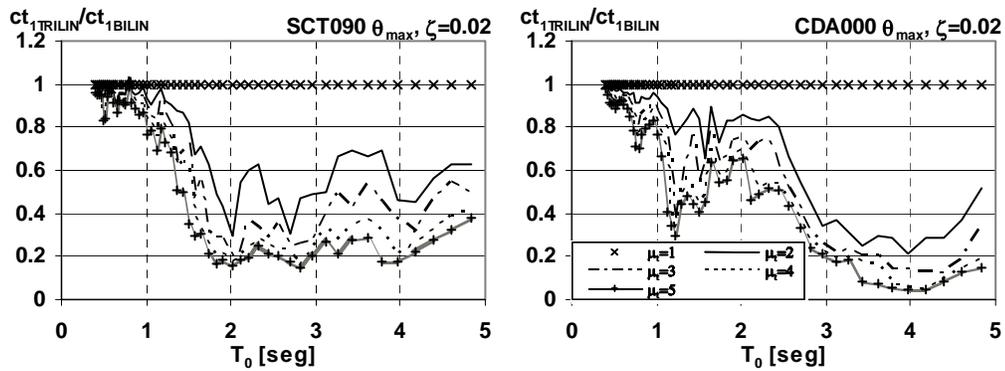


Figura AIII.3d Resistencia de colapso. Epicentro lejano, suelo (LS),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{max}$ .



**Figura AIII.3e** Resistencia de colapso. Registros CEN000 y TAF021 (clasificables en tipo LR),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{\max}$ .



**Figura AIII.3f** Resistencia de colapso. Registros SCT090 y CDA000 (clasificables en tipo LS),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{\max}$ .

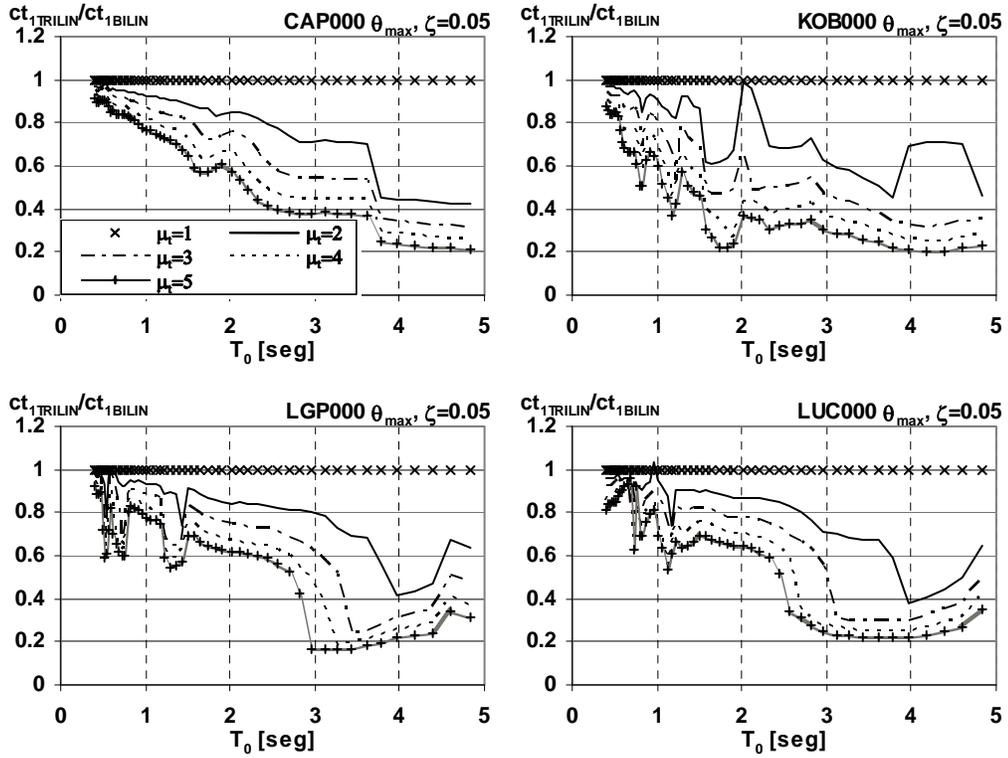


Figura AIII.4a Resistencia de colapso. Epicentro cercano, roca (CR),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{max}$ .

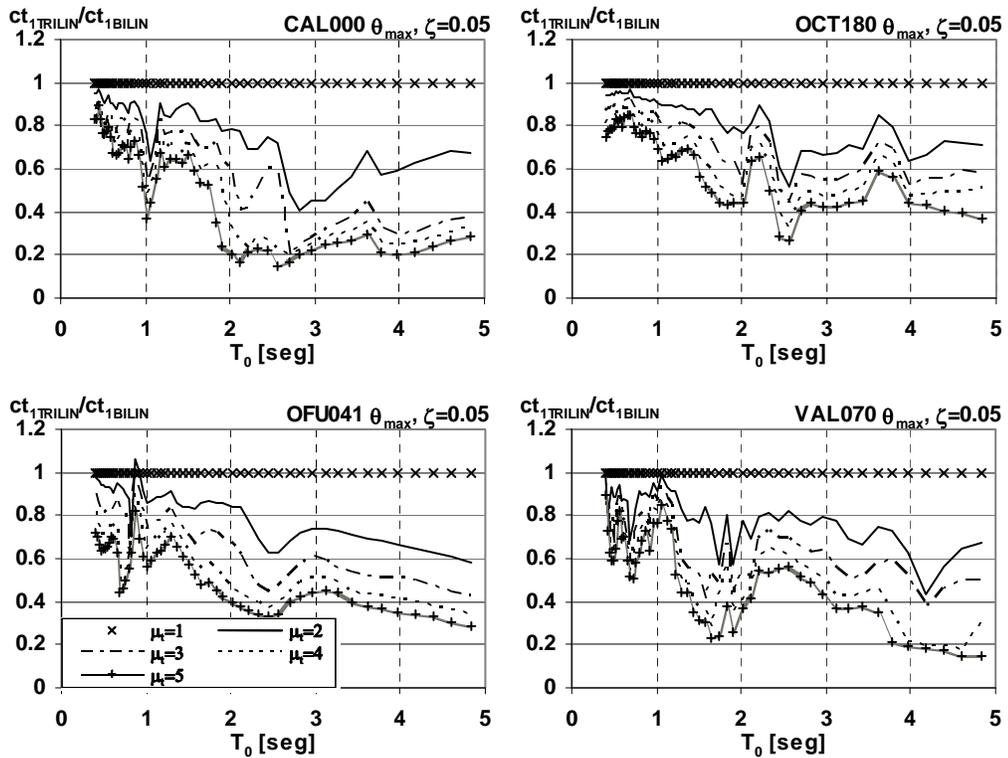


Figura AIII.4b Resistencia de colapso. Epicentro lejano, roca (LR),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{max}$ .

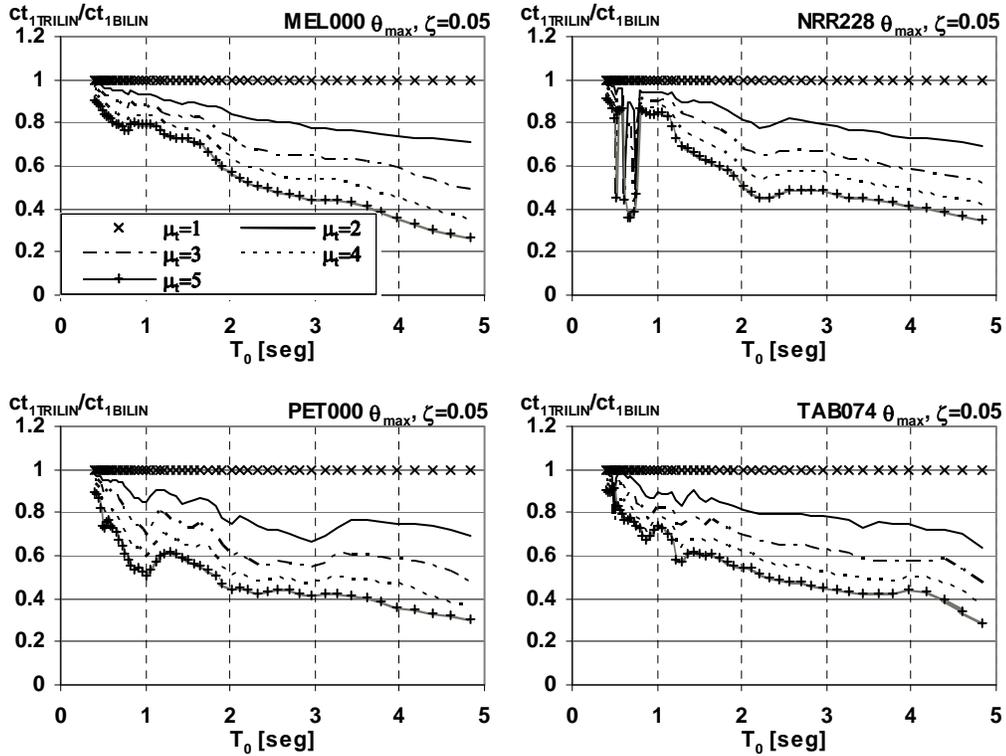


Figura AIII.4c Resistencia de colapso. Epicentro cercano, suelo (CS),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{max}$ .

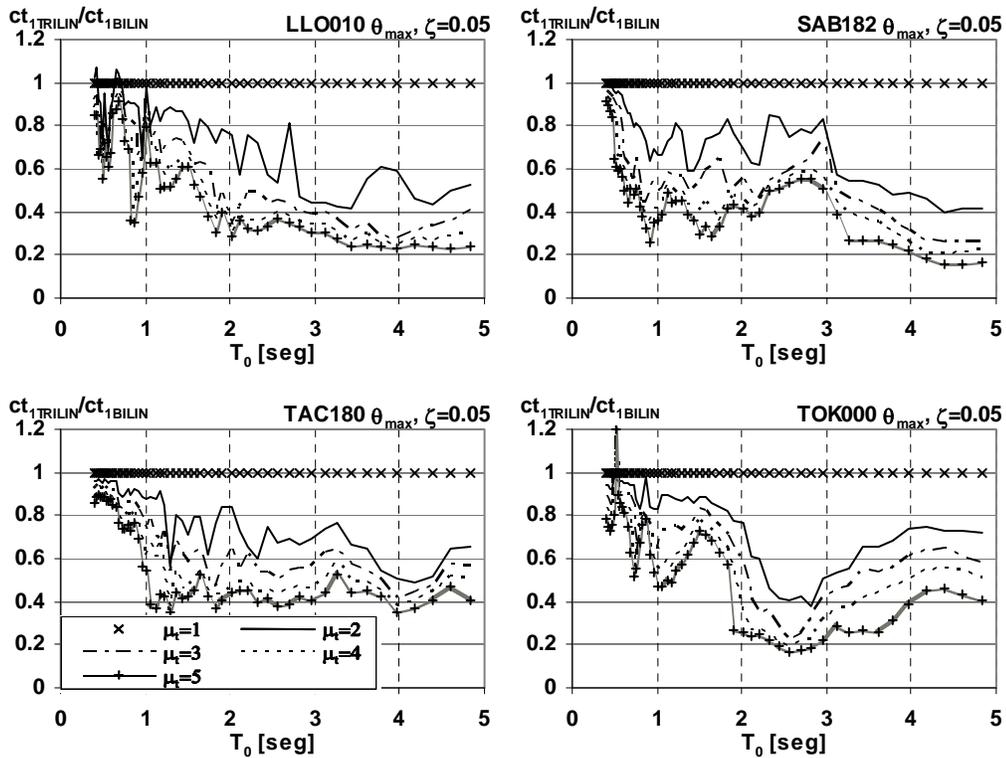
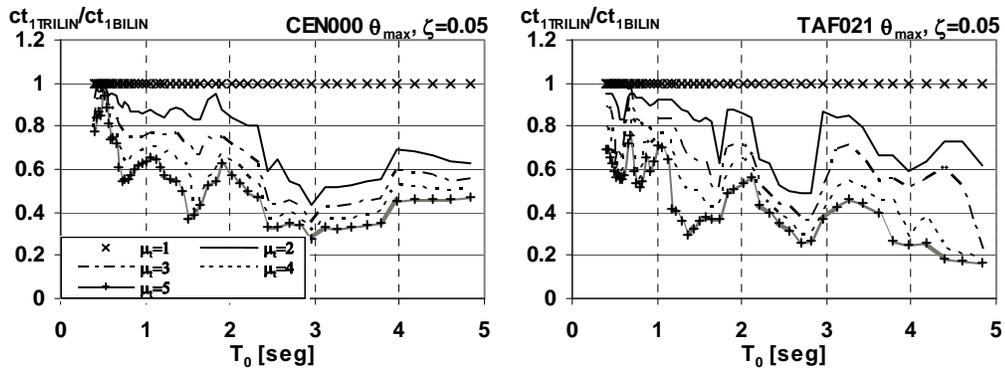
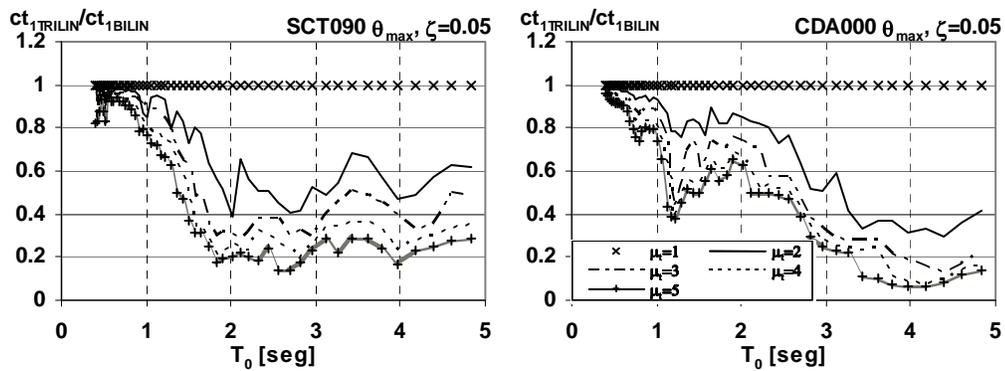


Figura AIII.4d Resistencia de colapso. Epicentro lejano, suelo (LS),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{max}$ .



**Figura AIII.4e** Resistencia de colapso. Registros CEN000 y TAF021 (clasificables en tipo LR),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{\max}$ .



**Figura AIII.4f** Resistencia de colapso. Registros SCT090 y CDA000 (clasificables en tipo LS),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{\max}$ .

## ANEXO IV

Se muestran espectros del trabajo monotónico de colapso ( $W_c$ , como se define en el inciso 3.2.2) mínimo necesario para alcanzar el desplazamiento de colapso ( $\delta_c$ ) para diferentes valores de ductilidad de transición ( $\mu_t$ ) en sistemas trilineales como el indicado en la figura 3.3. Las gráficas se presentan normalizadas al valor correspondiente a una transición repentina (sistema bilineal con  $\mu_t=1$ ). Los espectros se agrupan de acuerdo al tipo de suelo (ver inciso 2.5.1), porcentaje del amortiguamiento crítico ( $\xi$ ) y coeficiente de estabilidad ( $\theta$ ). Los subíndices BILIN y TRILIN significan bilineal y trilineal respectivamente.

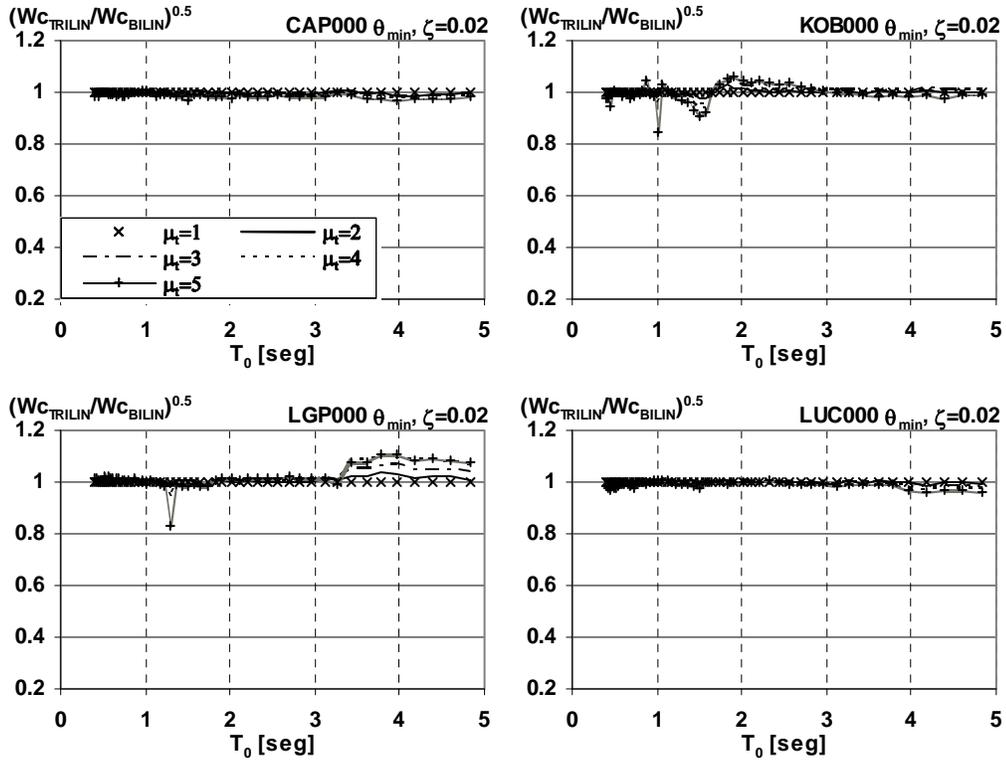


Figura AIV.1a Trabajo monotónico de colapso. Terreno cercano, roca (CR),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{min}$ .

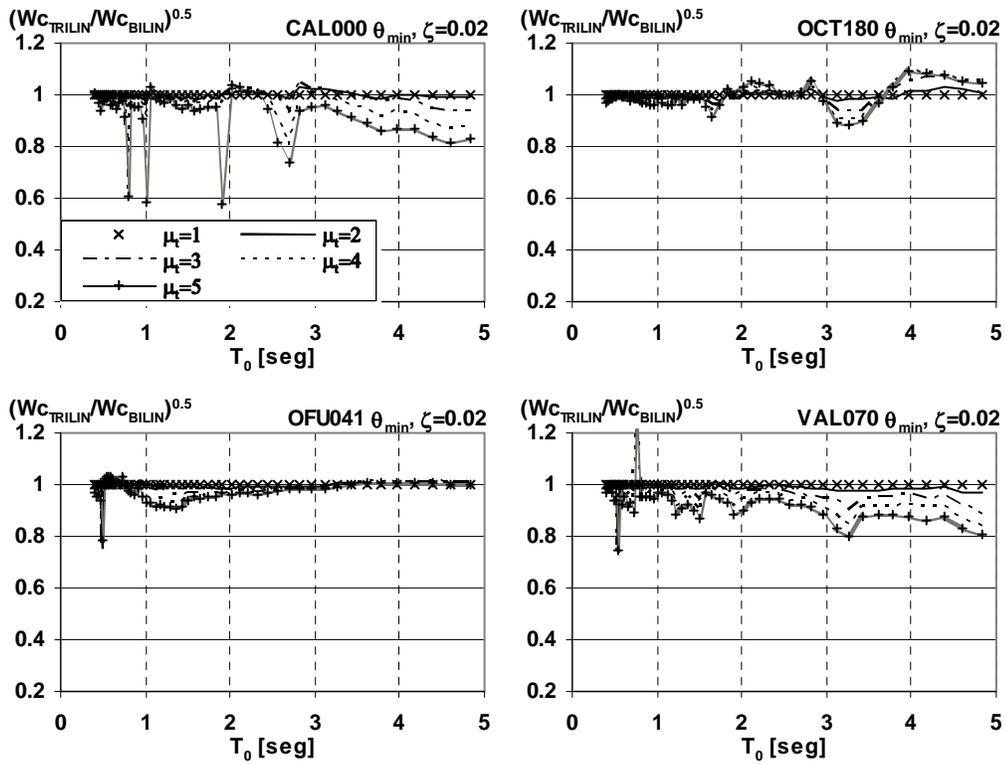


Figura AIV.1b Trabajo monotónico de colapso. Terreno lejano, roca (LR),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{min}$ .

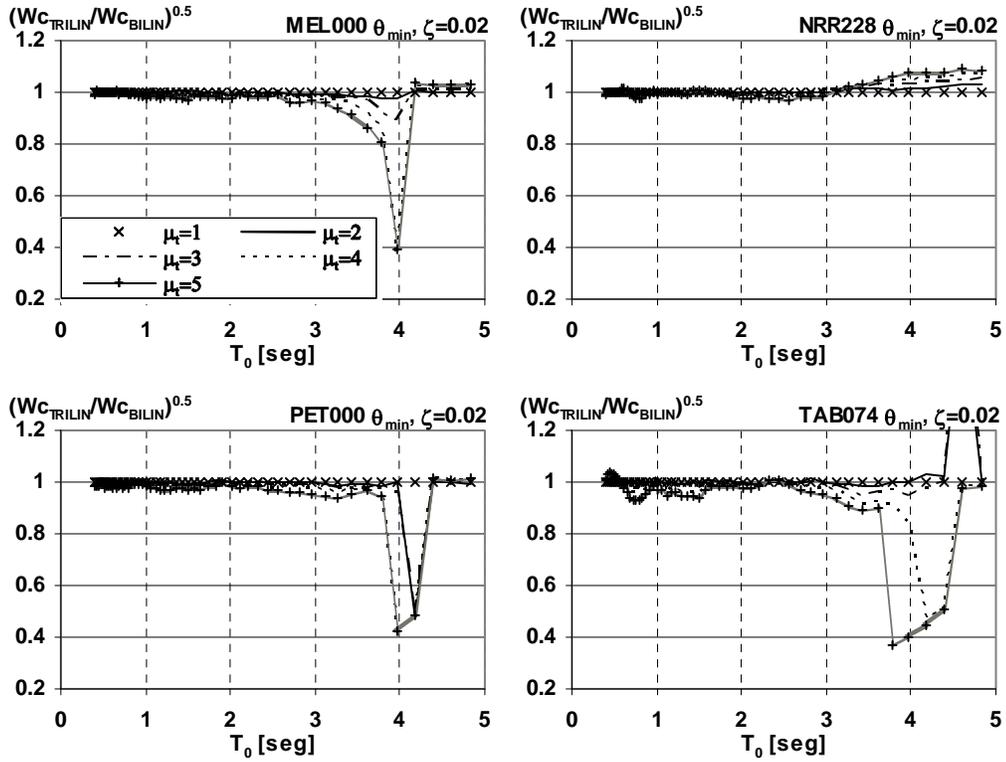


Figura AIV.1c Trabajo monotónico de colapso. Terreno cercano, suelo (CS),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{min}$ .

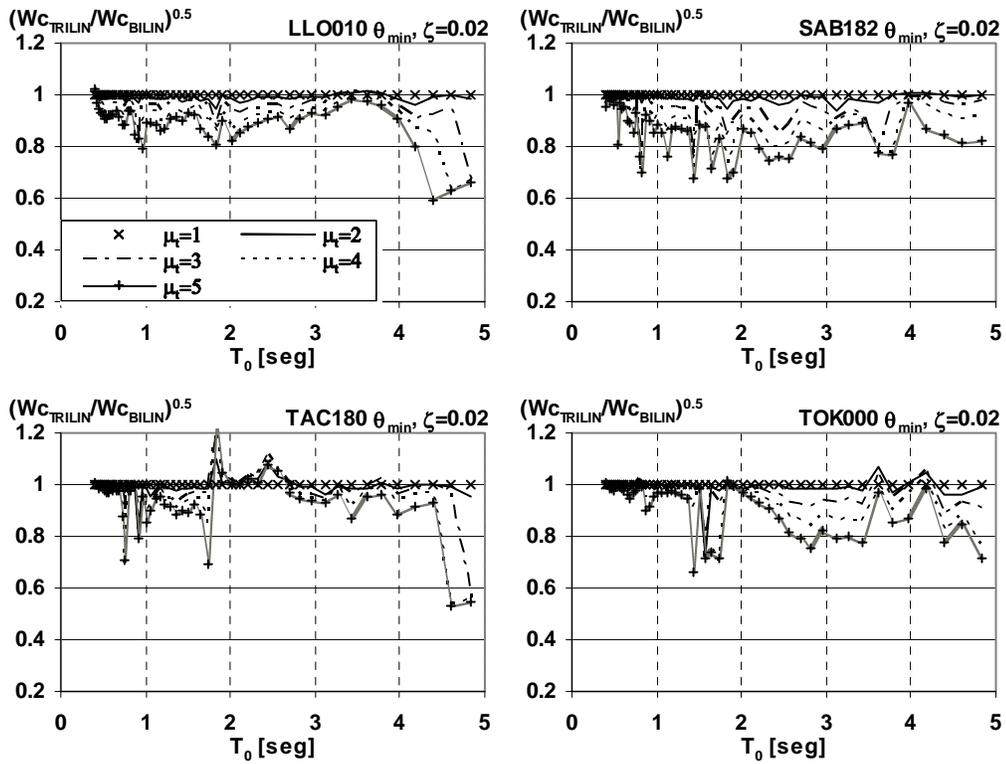
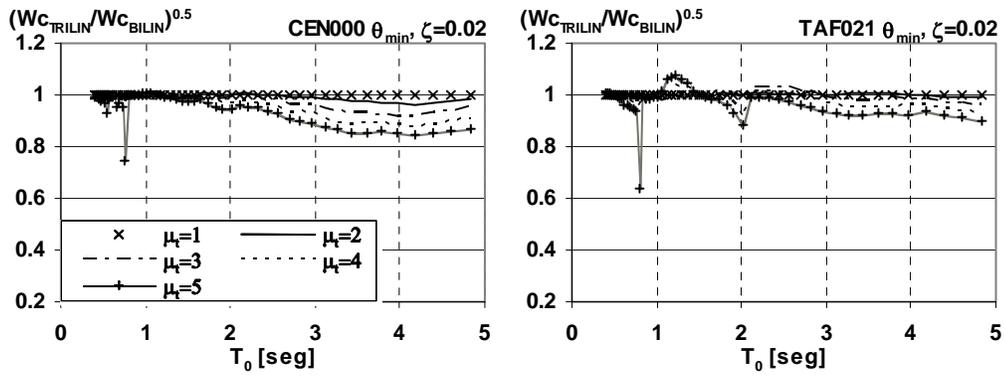
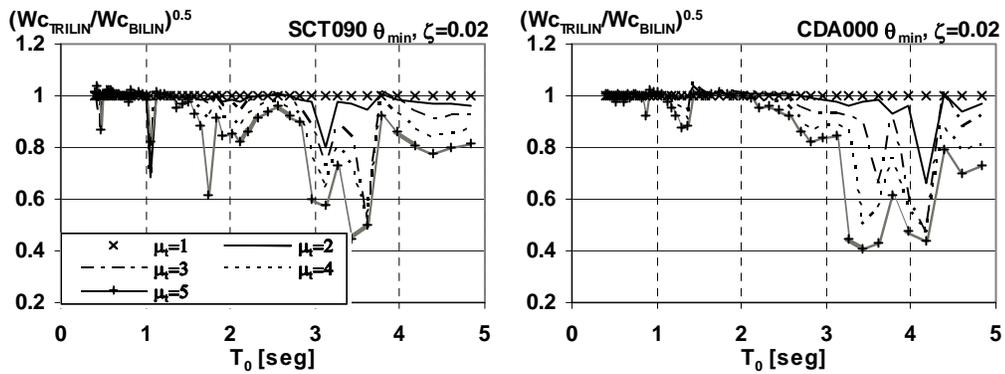


Figura AIV.1d Trabajo monotónico de colapso. Terreno lejano, suelo (LS),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{min}$ .



**Figura AIV.1e** Espectros de trabajo monótonico de colapso ( $W_c$ ). Registros CEN y TAF (clasificables en tipo LR),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{\min}$ .



**Figura AIV.1f** Espectros de trabajo monótonico de colapso ( $W_c$ ). Registros SCT y CDA (clasificables en tipo LS),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{\min}$ .

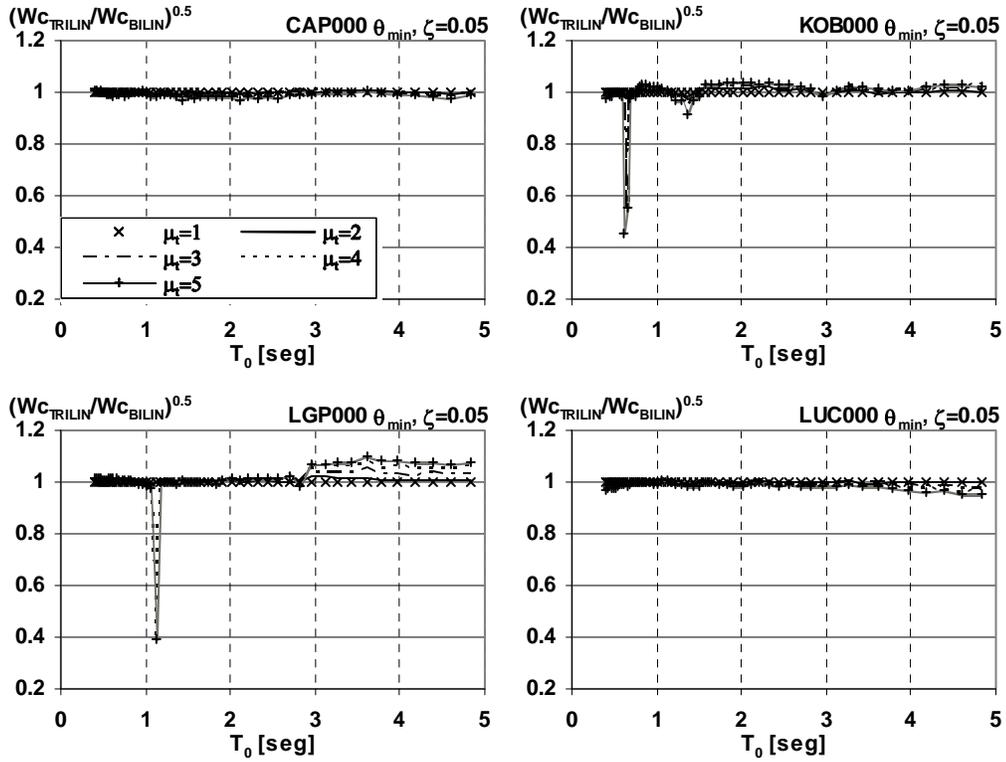


Figura AIV.2a Trabajo monotónico de colapso. Terreno cercano, roca (CR),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{min}$ .

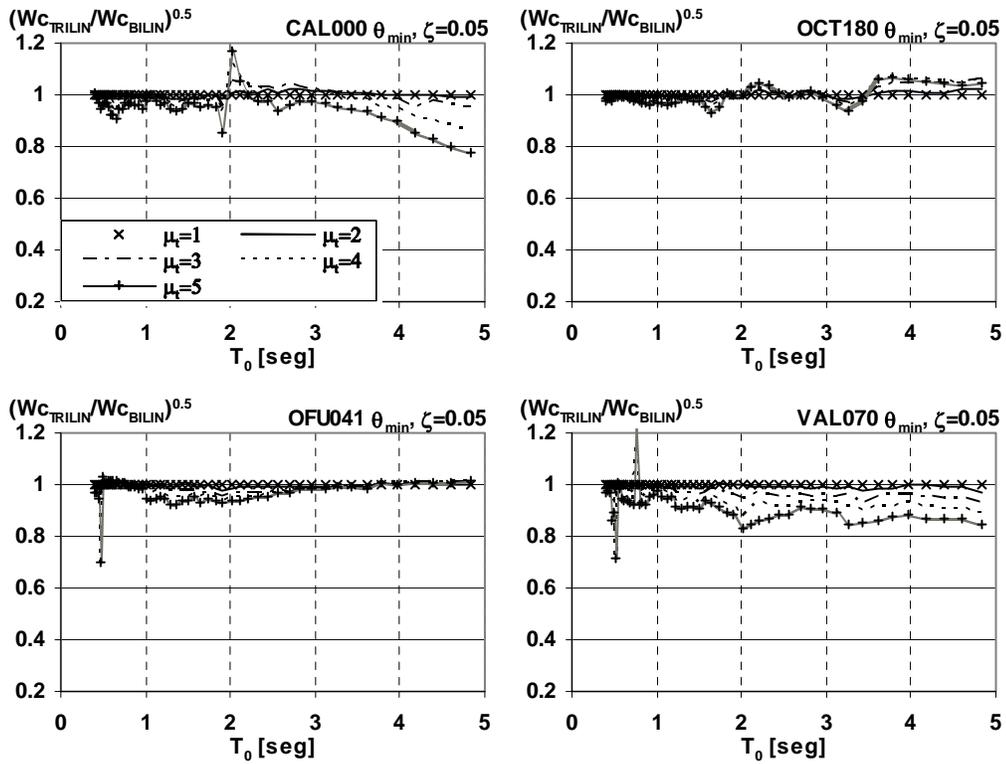


Figura AIV.2b Trabajo monotónico de colapso. Terreno lejano, roca (LR),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{min}$ .

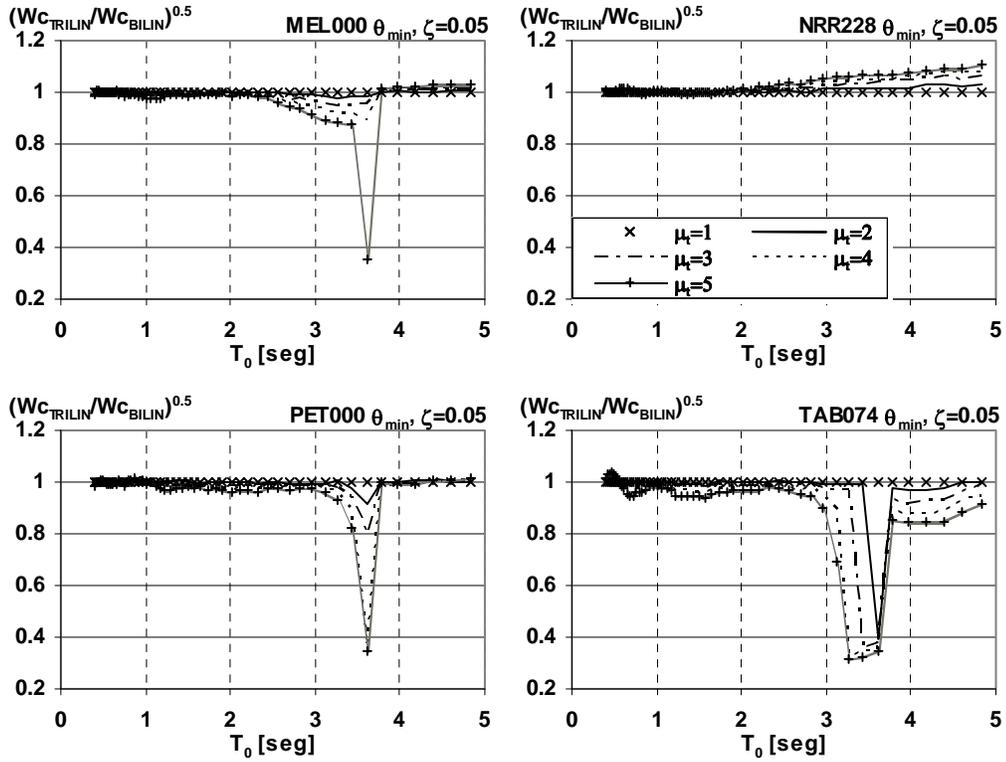


Figura AIV.2c Trabajo monótonico de colapso. Terreno cercano, suelo (CS),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{min}$ .

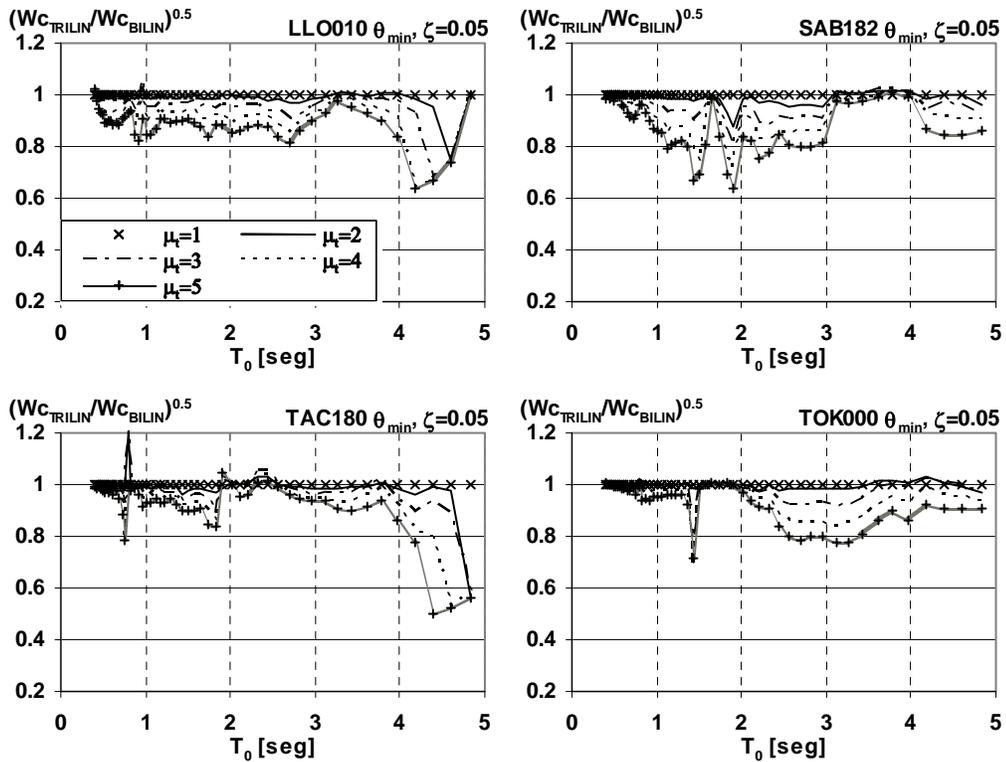


Figura AIV.2d Trabajo monótonico de colapso. Terreno lejano, suelo (LS),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{min}$ .

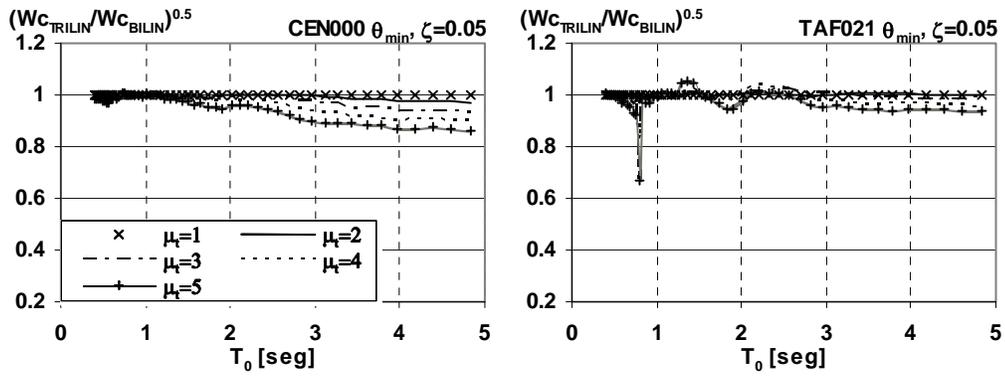


Figura AIV.2e Espectros de trabajo monótonico de colapso ( $W_c$ ). Registros CEN y TAF (clasificables en tipo LR),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{min}$ .

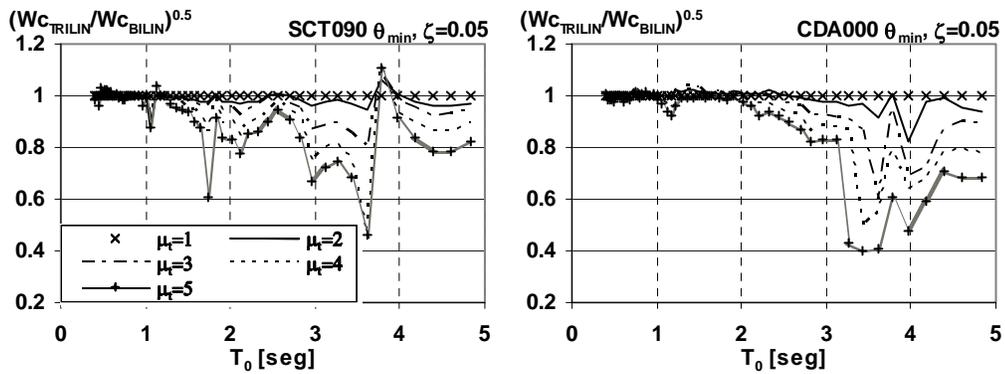


Figura AIV.2f Espectros de trabajo monótonico de colapso ( $W_c$ ). Registros SCT y CDA (clasificables en tipo LS),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{min}$ .

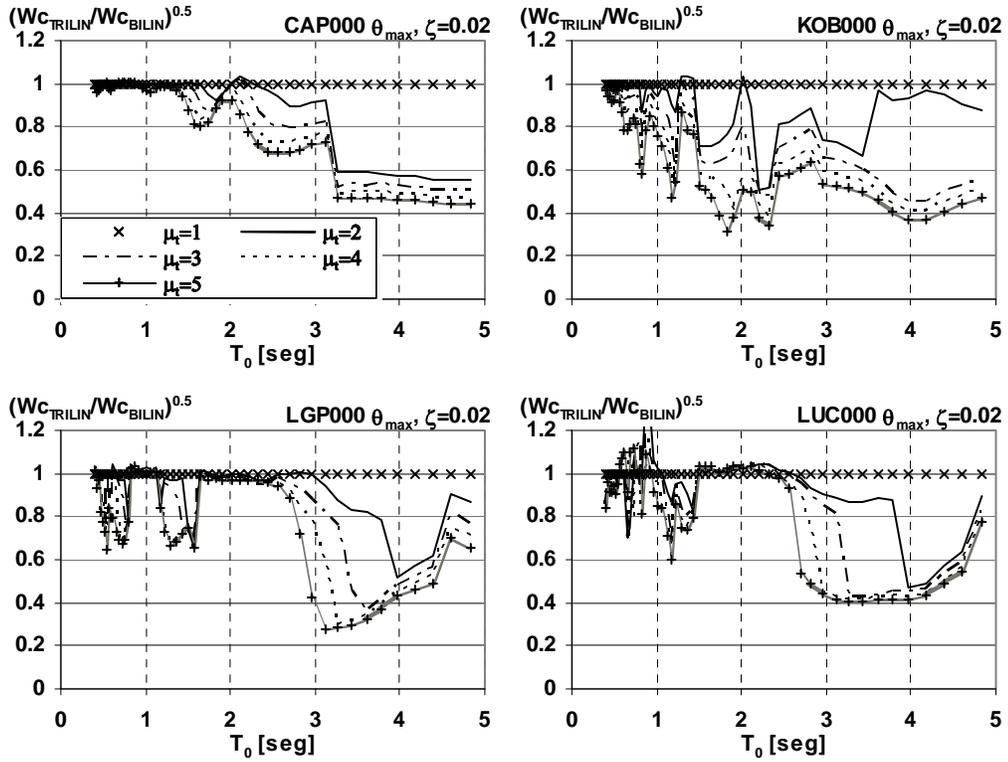


Figura AIV.3a Trabajo monotónico de colapso. Terreno cercano, roca (CR),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{max}$ .

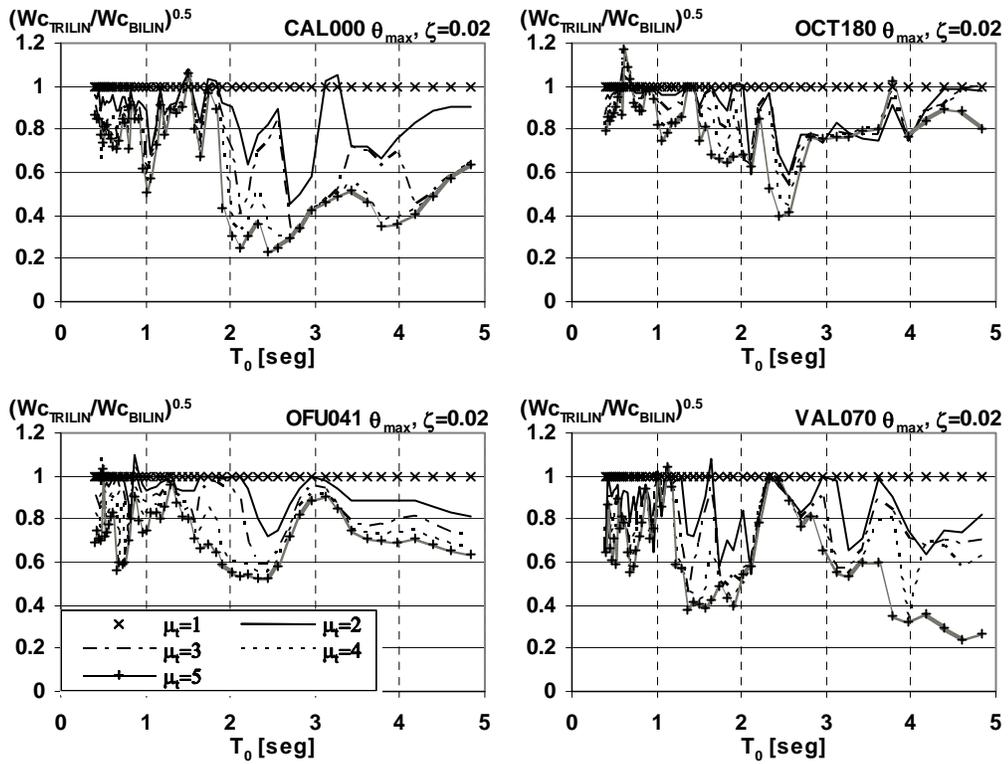


Figura AIV.3b Trabajo monotónico de colapso. Terreno lejano, roca (LR),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{max}$ .

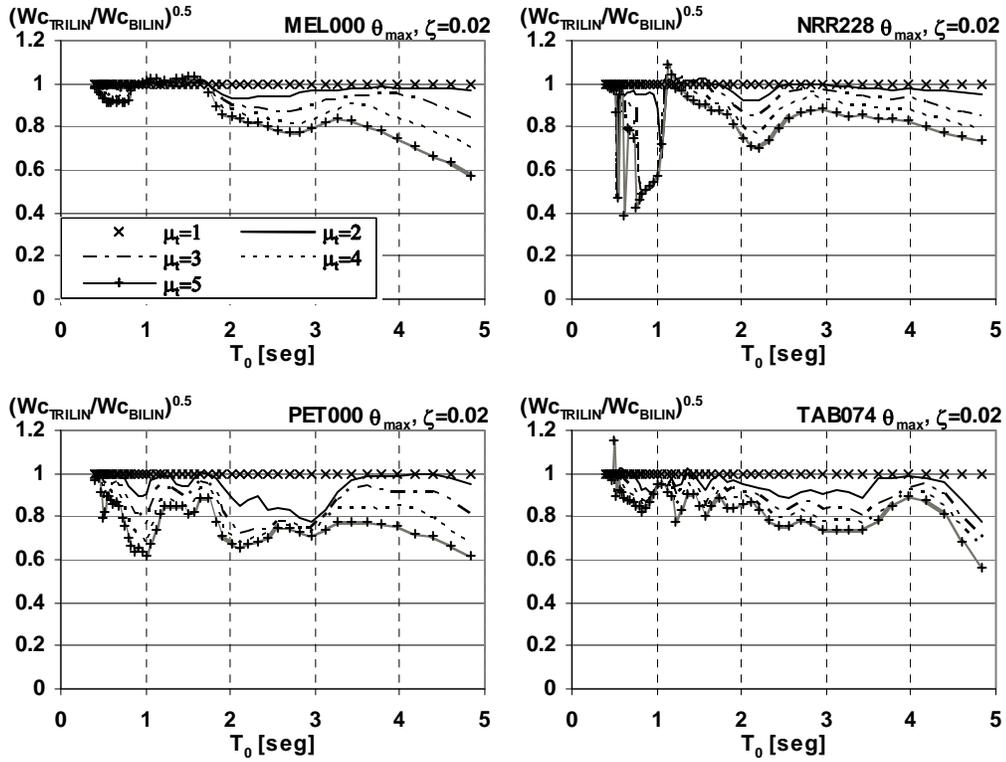


Figura AIV.3c Trabajo monótonico de colapso. Terreno cercano, suelo (CS),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{max}$ .

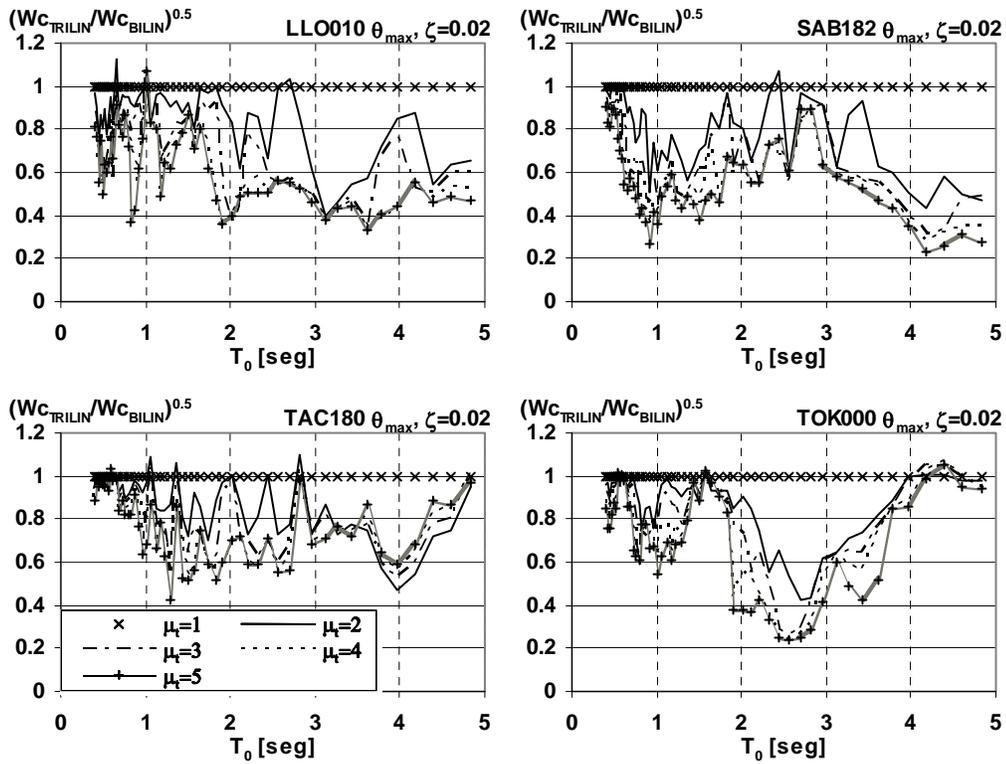
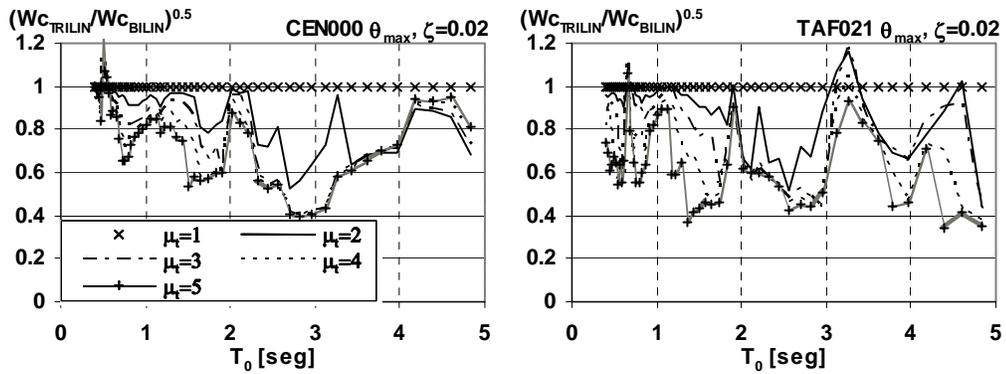
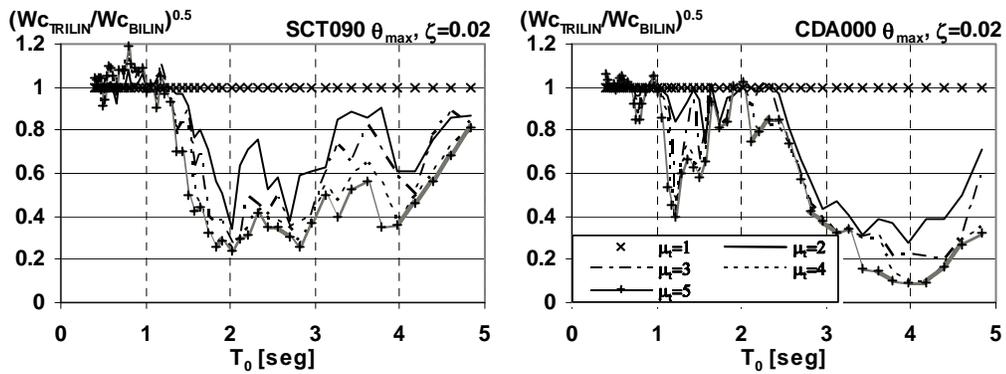


Figura AIV.3d Trabajo monótonico de colapso. Terreno lejano, suelo (LS),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{max}$ .



**Figura AIV.3e** Espectros de trabajo monótonico de colapso ( $W_c$ ). Registros CEN y TAF (clasificables en tipo LR),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{max}$ .



**Figura AIV.3f** Espectros de trabajo monótonico de colapso ( $W_c$ ). Registros SCT y CDA (clasificables en tipo LS),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{max}$ .

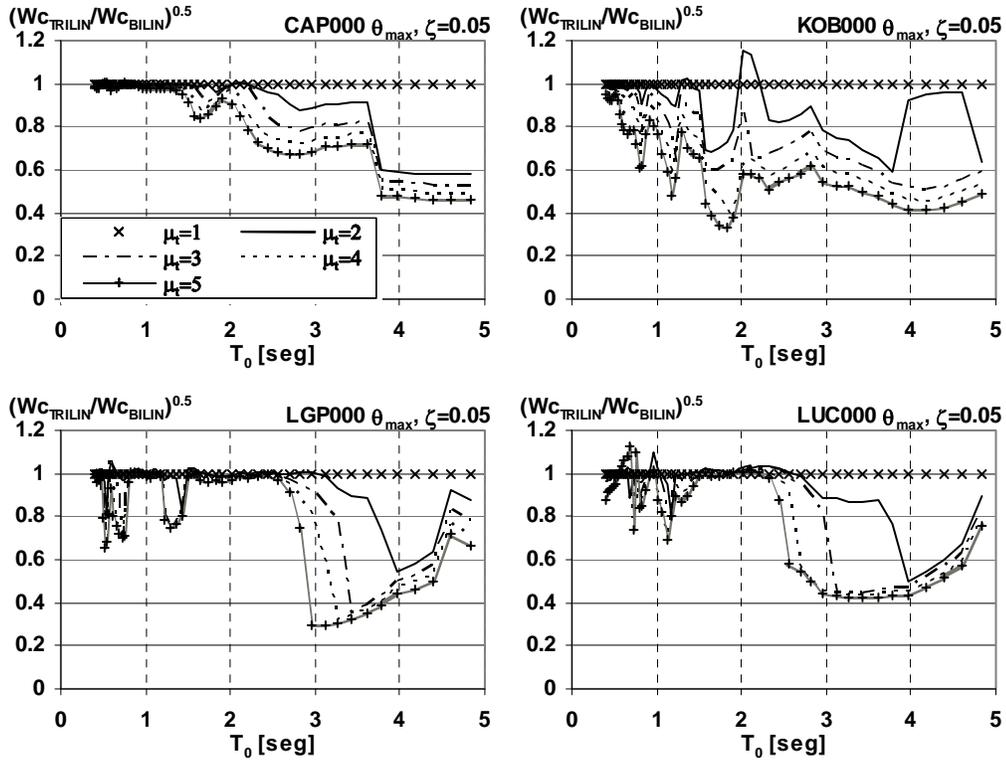


Figura AIV.4a Trabajo monotónico de colapso. Terreno cercano, roca (CR),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{max}$ .

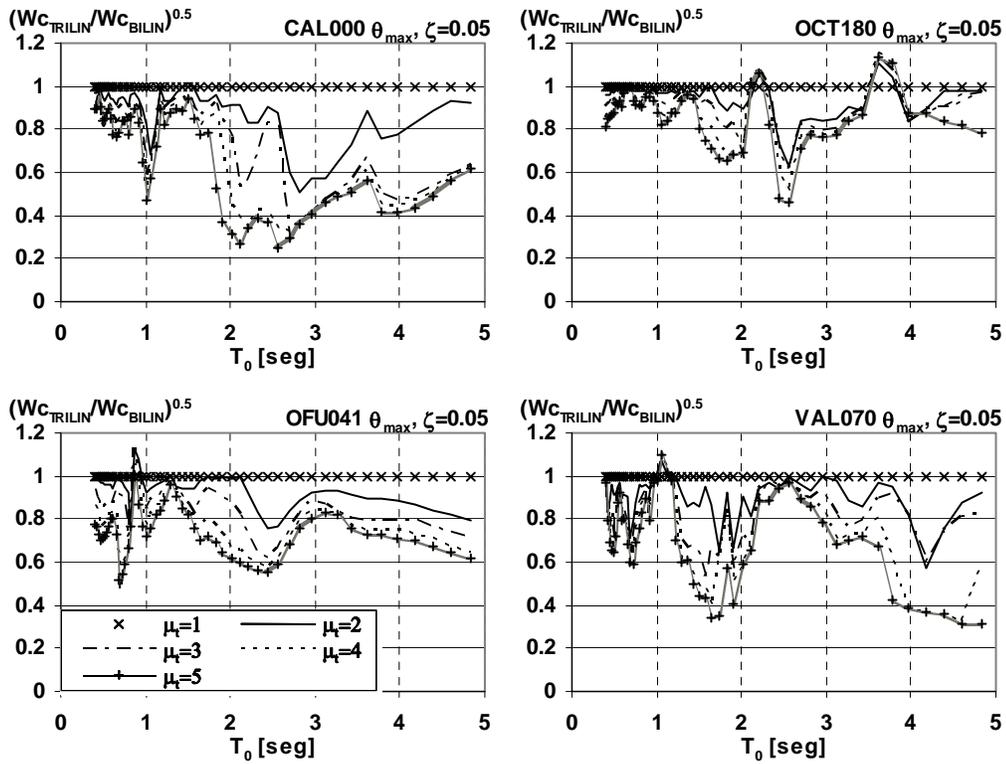


Figura AIV.4b Trabajo monotónico de colapso. Terreno lejano, roca (LR),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{max}$ .

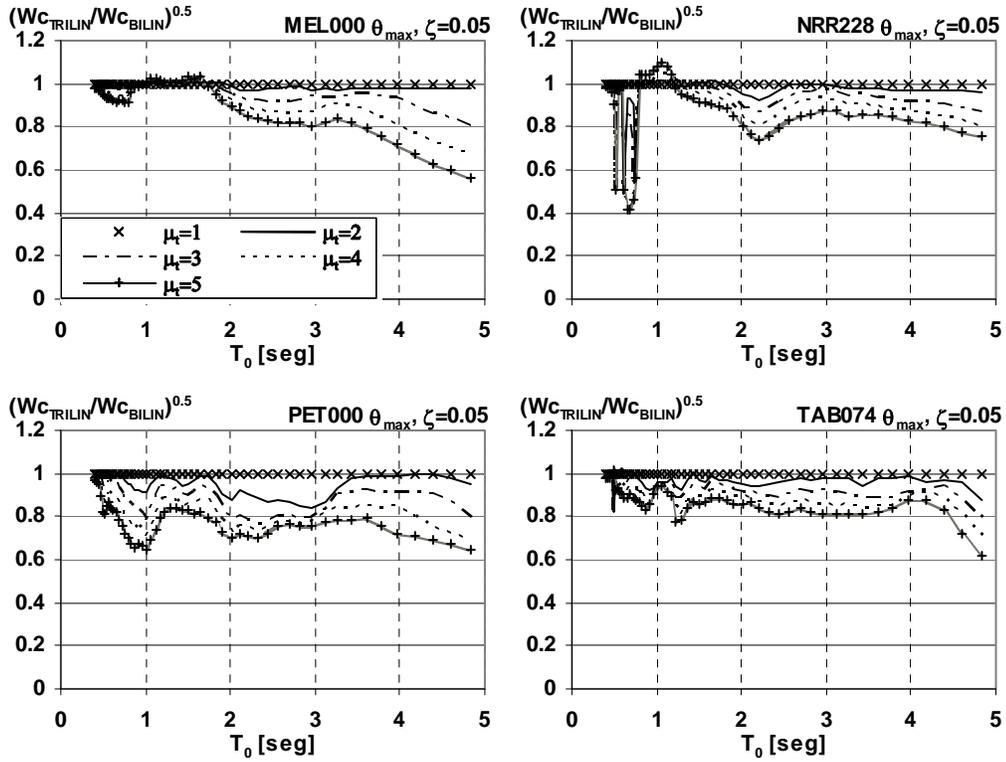


Figura AIV.4c Trabajo monotónico de colapso. Terreno cercano, suelo (CS),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{max}$ .

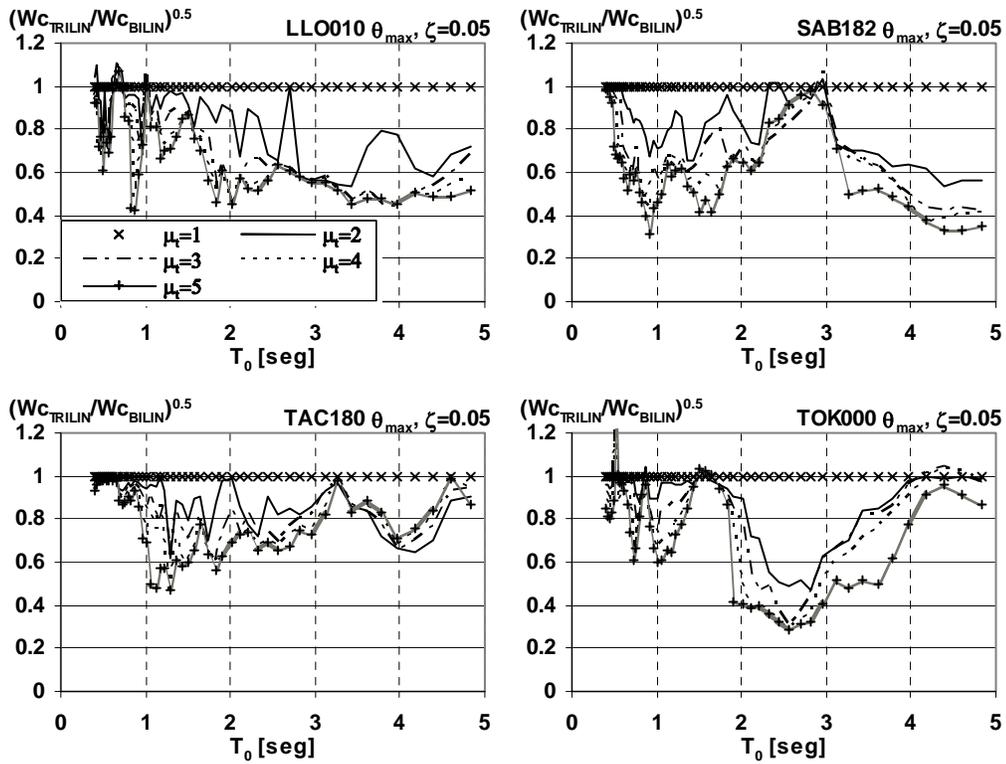
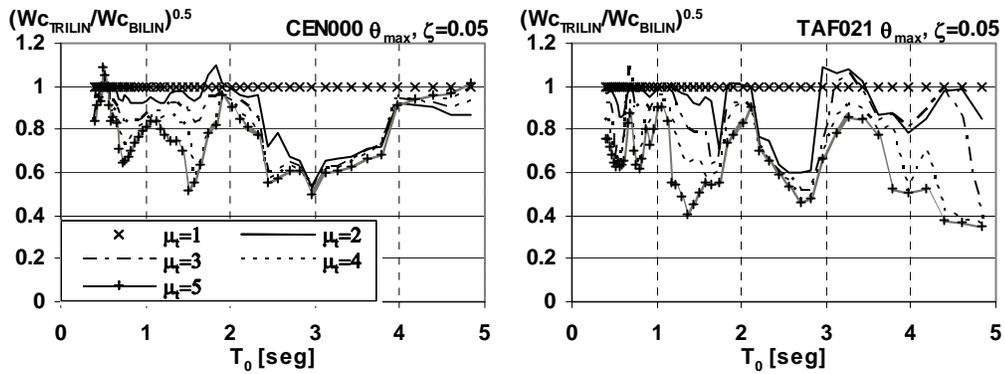
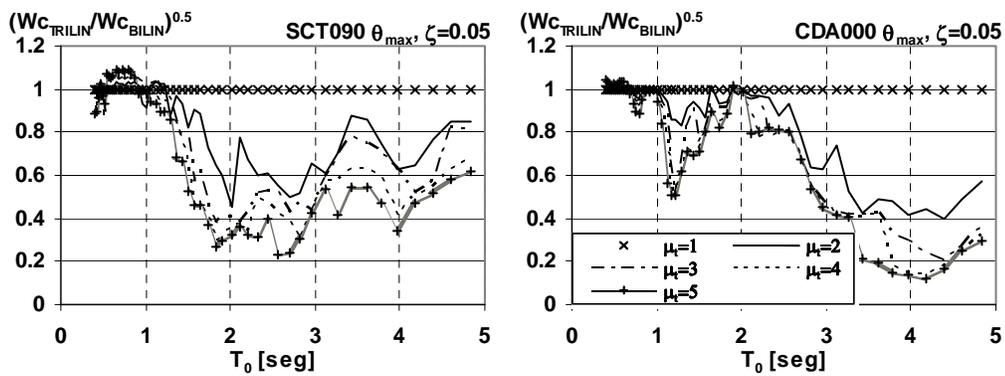


Figura AIV.4d Trabajo monotónico de colapso. Terreno lejano, suelo (LS),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{max}$ .



**Figura AIV.4e** Espectros de trabajo monótonico de colapso ( $W_c$ ). Registros CEN y TAF (clasificables en tipo LR),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{max}$ .



**Figura AIV.4f** Espectros de trabajo monótonico de colapso ( $W_c$ ). Registros SCT y CDA (clasificables en tipo LS),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{max}$ .

## ANEXO V

Se muestran espectros de la energía total máxima de colapso ( $E_{tm}$ , como se define en el inciso 3.2.3) que se genera en la respuesta asociada al sistema que posee la resistencia mínima necesaria para alcanzar el desplazamiento de colapso ( $\delta_c$ ) para diferentes valores de ductilidad de transición ( $\mu_t$ ) en sistemas trilineales como el indicado en la figura 3.2. Las gráficas se presentan normalizadas al valor correspondiente a una transición repentina (sistema bilineal con  $\mu_t = 1$ ). Los espectros se agrupan de acuerdo al tipo de suelo (ver inciso 2.5.1), porcentaje del amortiguamiento crítico ( $\xi$ ) y coeficiente de estabilidad ( $\theta$ ). Los subíndices BILIN y TRILIN significan bilineal y trilineal respectivamente.

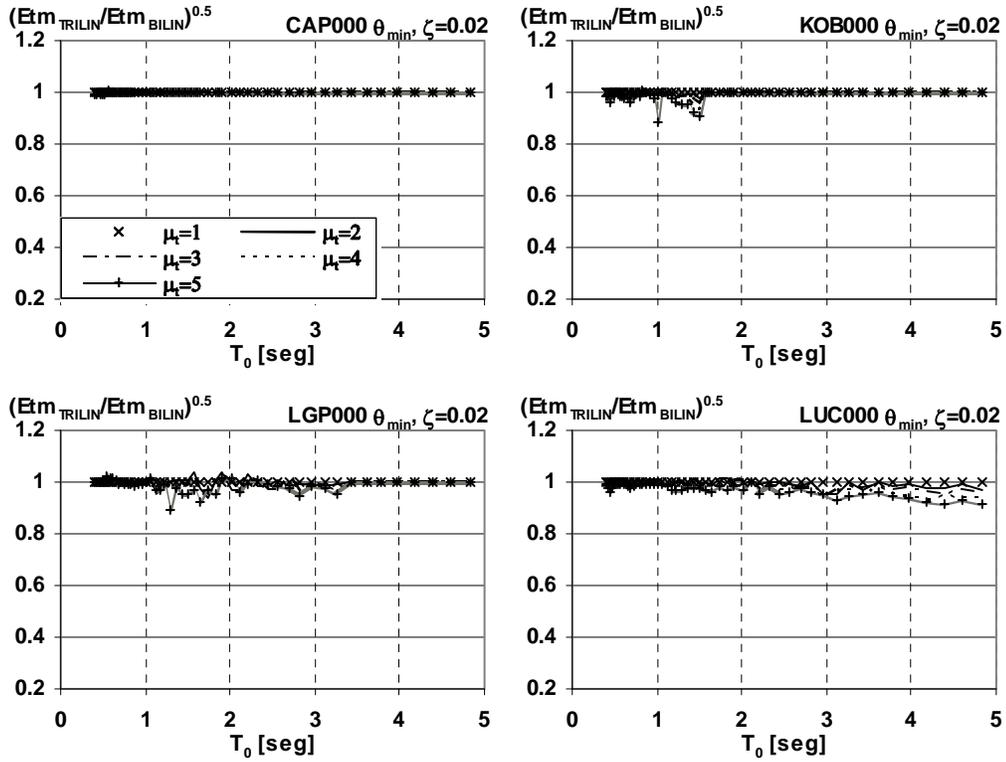


Figura AV.1a Energía total máxima de colapso. Terreno cercano, roca (CR),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{min}$ .

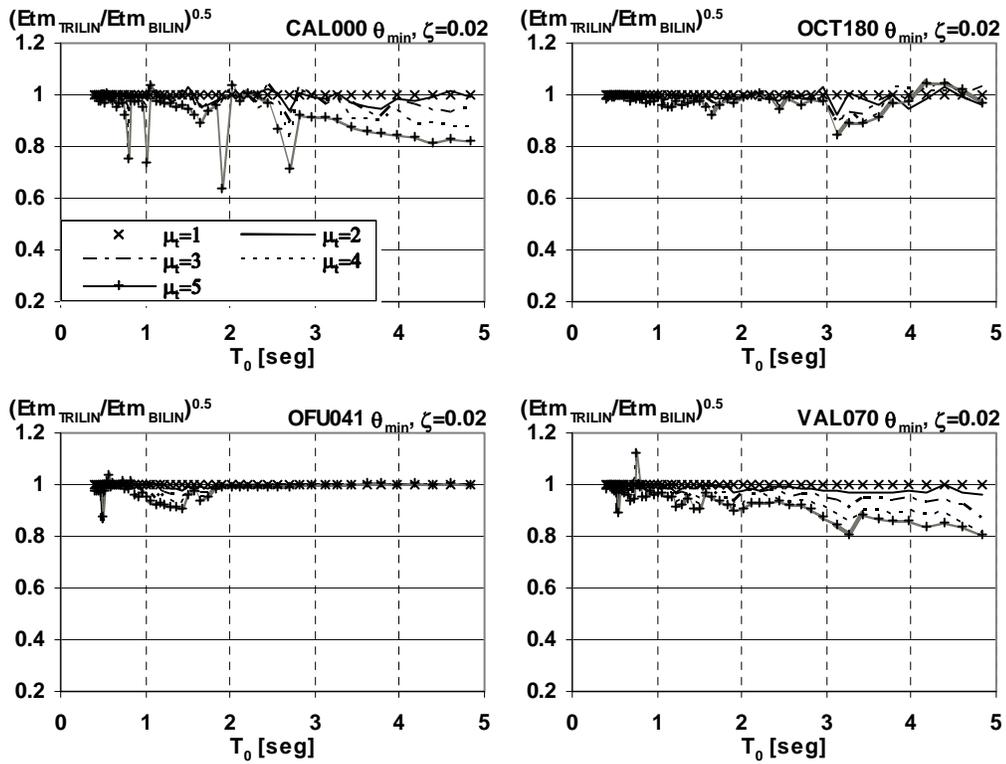


Figura AV.1b Energía total máxima de colapso. Terreno lejano, roca (LR),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{min}$ .

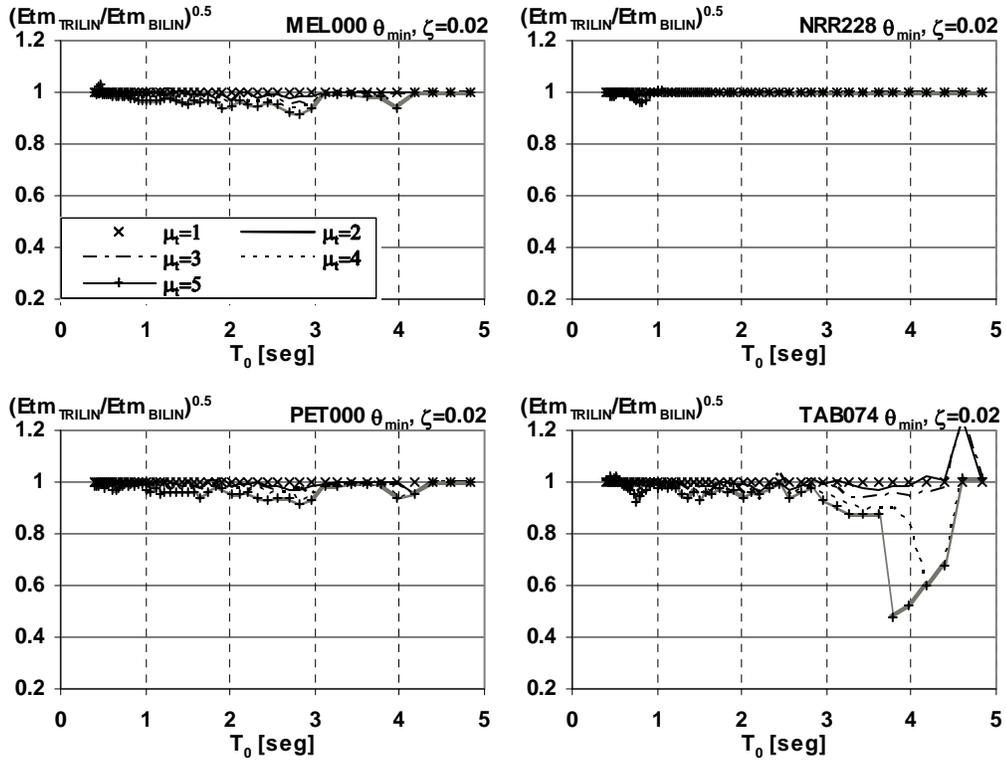


Figura AV.1c Energía total máxima de colapso. Terreno cercano, suelo (CS),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{min}$ .

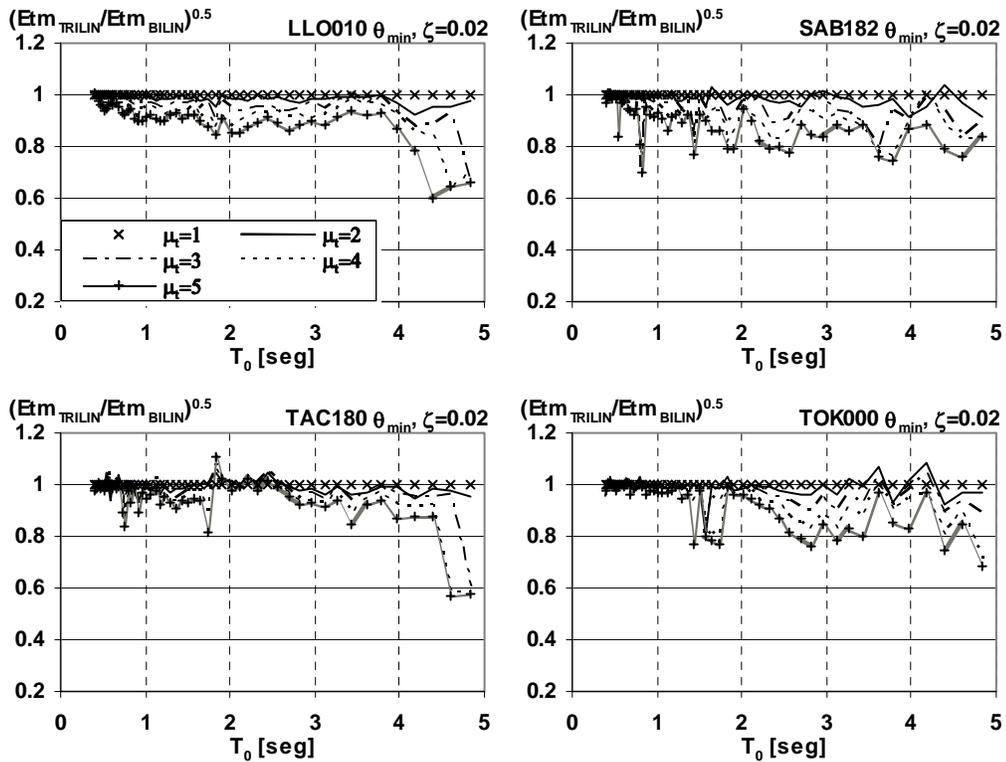
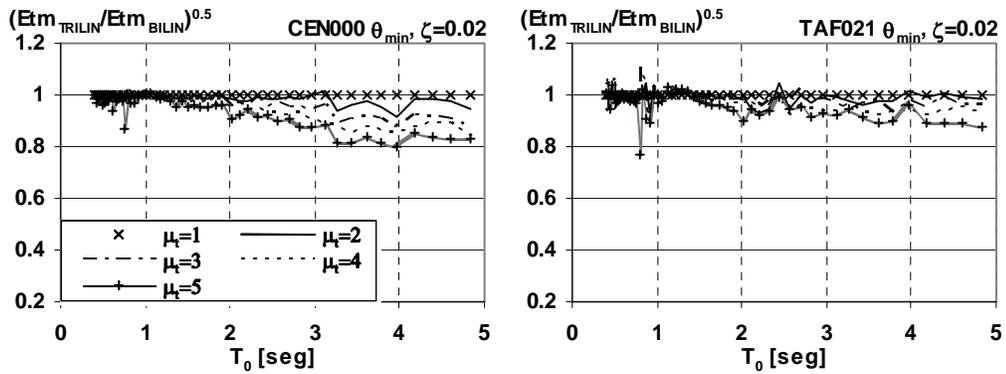
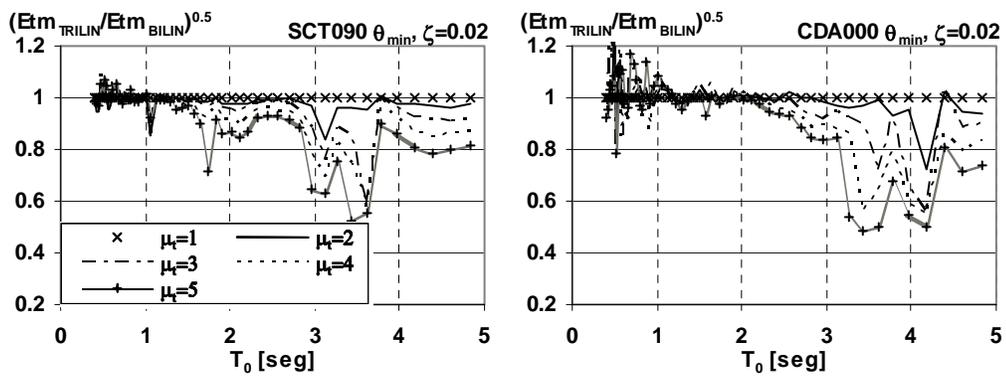


Figura AV.1d Energía total máxima de colapso. Terreno lejano, suelo (LS),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{min}$ .



**Figura AV.1e** Espectros de energía total máxima de colapso. Registros CEN y TAF (clasificables en tipo LR),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{\min}$ .



**Figura AV.1f** Espectros de energía total máxima de colapso. Registros SCT y CDA (clasificables en tipo LS),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{\min}$ .

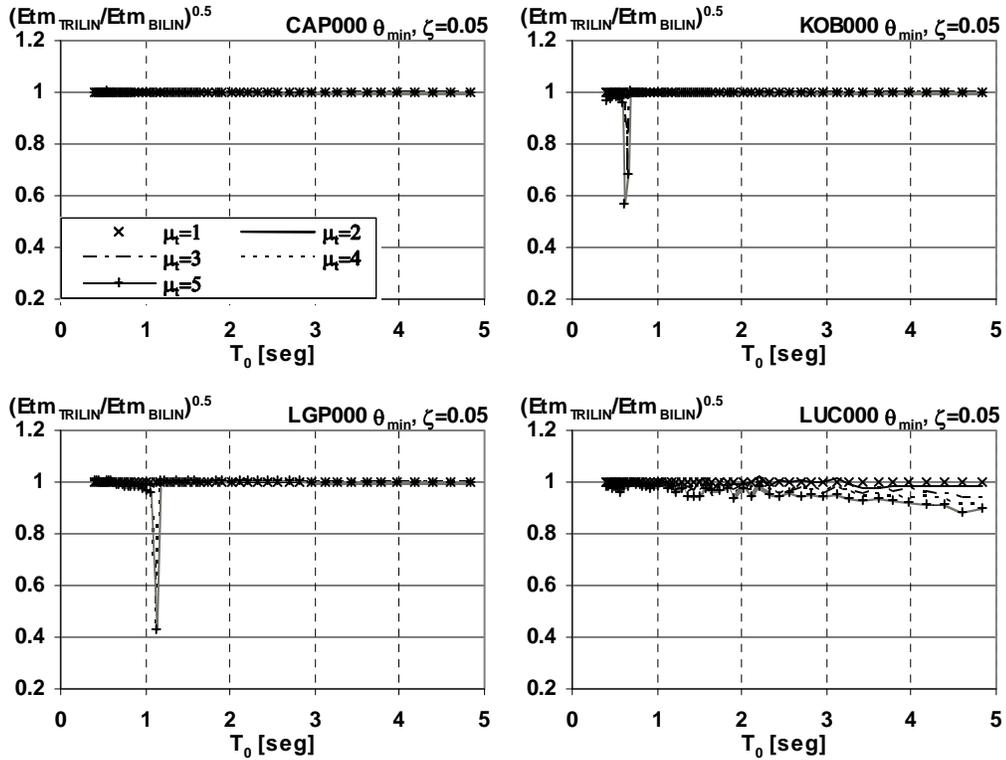


Figura AV.2a Energía total máxima de colapso. Terreno cercano, roca (CR),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{min}$ .

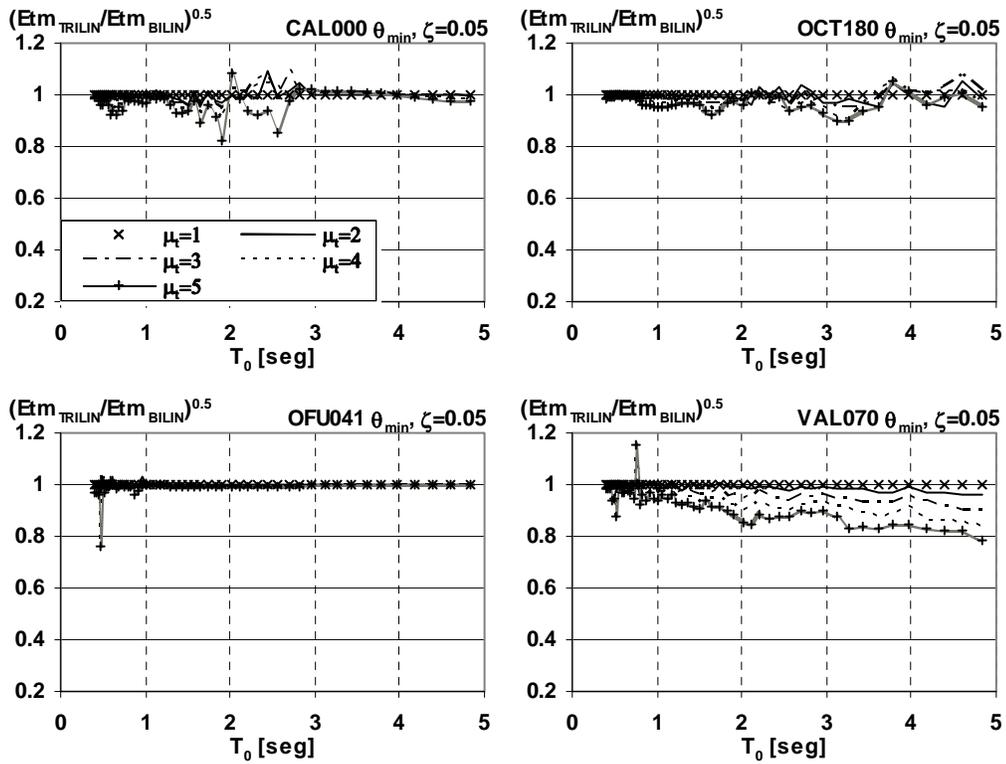


Figura AV.2b Energía total máxima de colapso. Terreno lejano, roca (LR),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{min}$ .

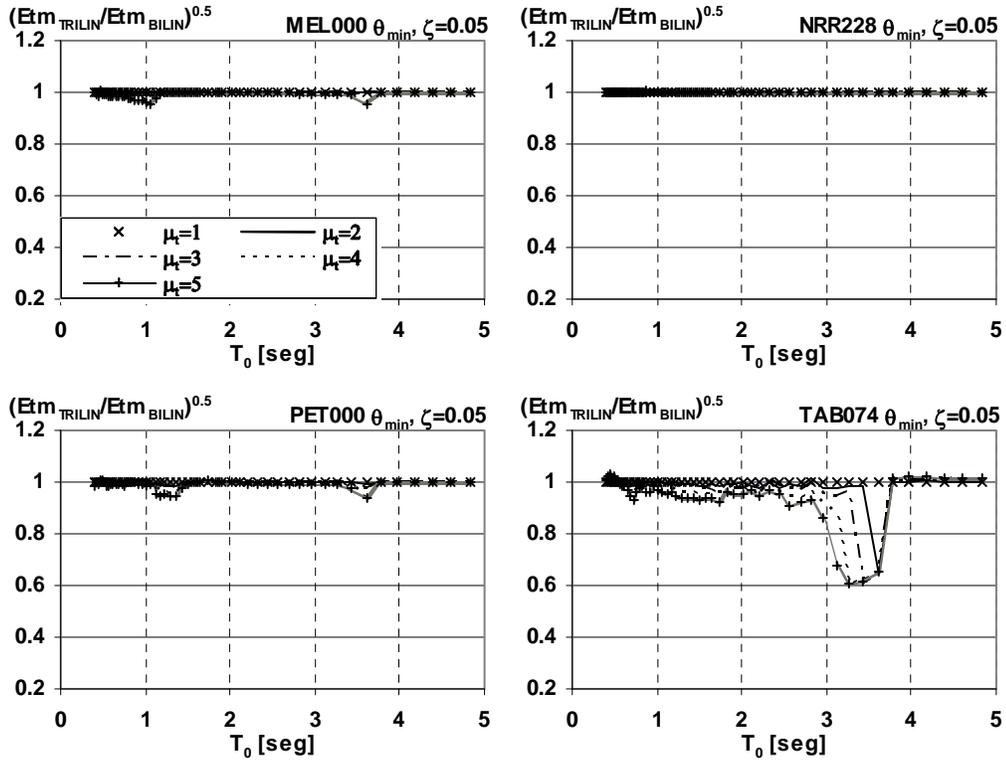


Figura AV.2c Energía total máxima de colapso. Terreno cercano, suelo (CS),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{min}$ .

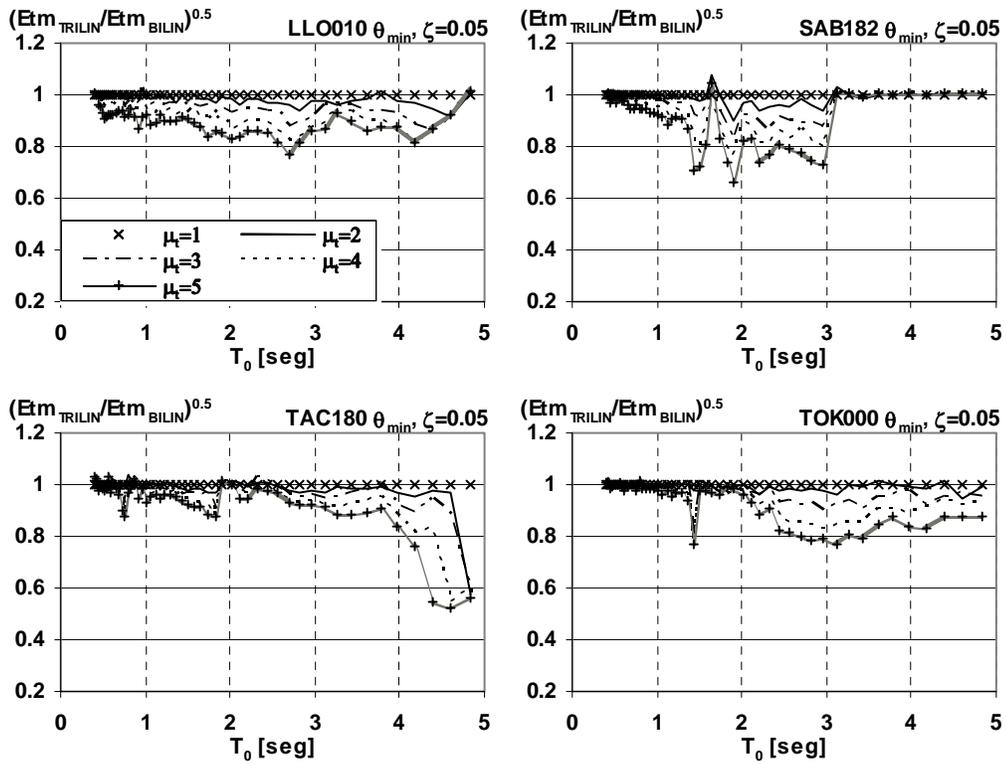
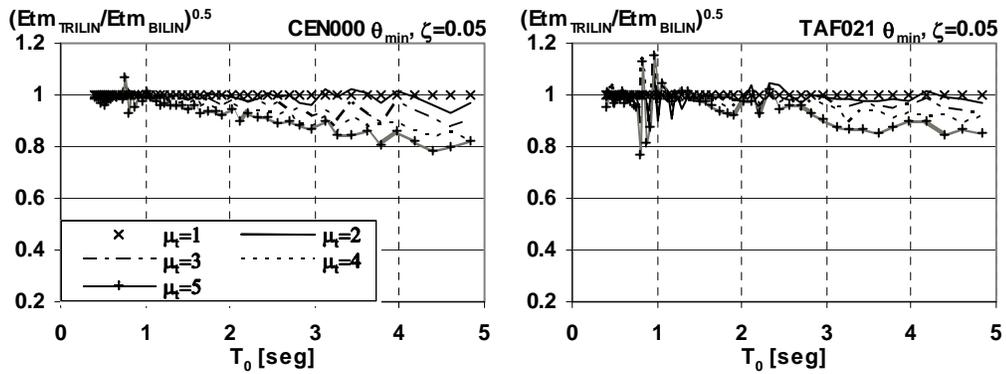
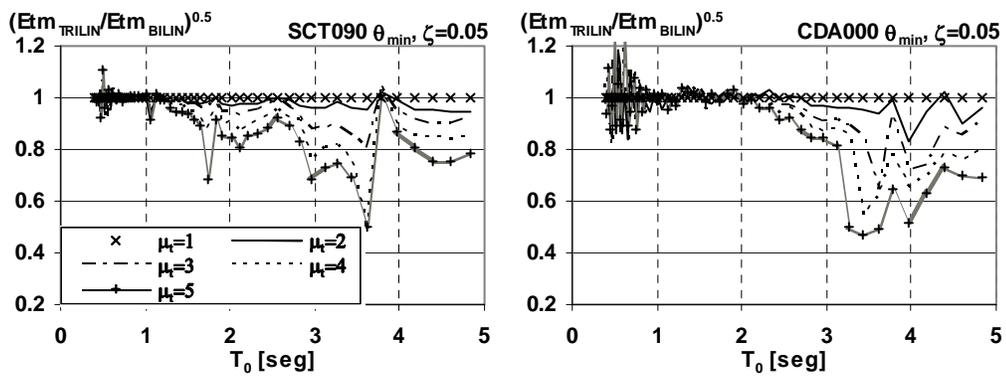


Figura AV.2d Energía total máxima de colapso. Terreno lejano, suelo (LS),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{min}$ .



**Figura AV.2e** Espectros de energía total máxima de colapso. Registros CEN y TAF (clasificables en tipo LR),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{min}$ .



**Figura AV.2f** Espectros de energía total máxima de colapso. Registros SCT y CDA (clasificables en tipo LS),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{min}$ .

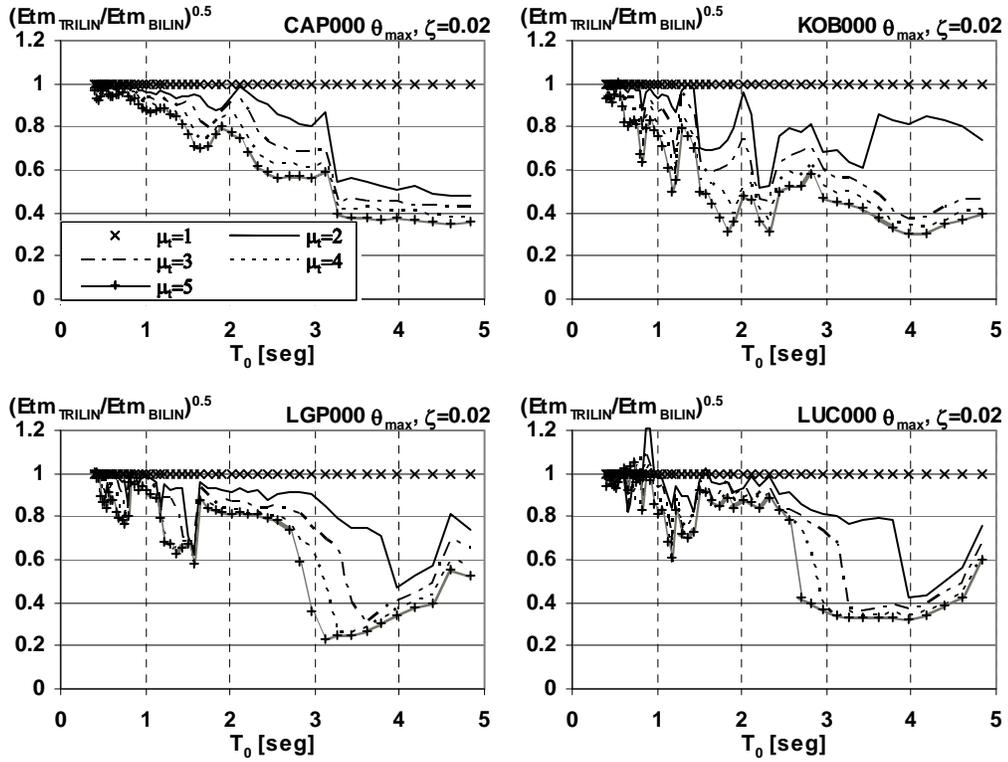


Figura AV.3a Energía total máxima de colapso. Terreno cercano, roca (CR),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{max}$ .

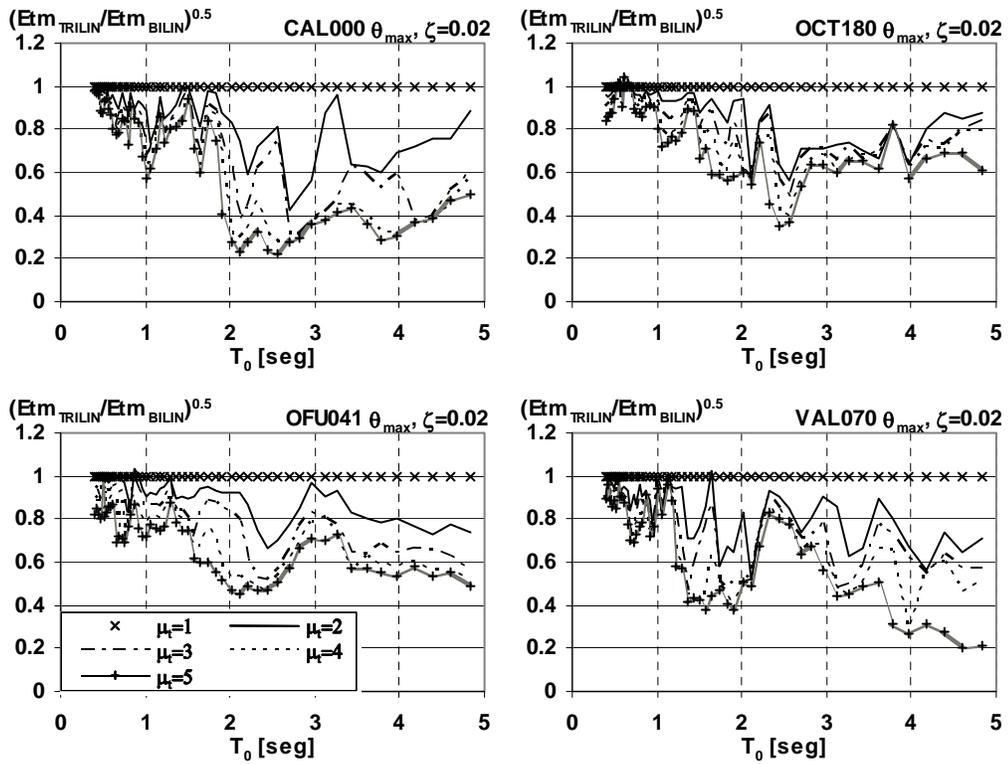


Figura AV.3b Energía total máxima de colapso. Terreno lejano, roca (LR),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{max}$ .

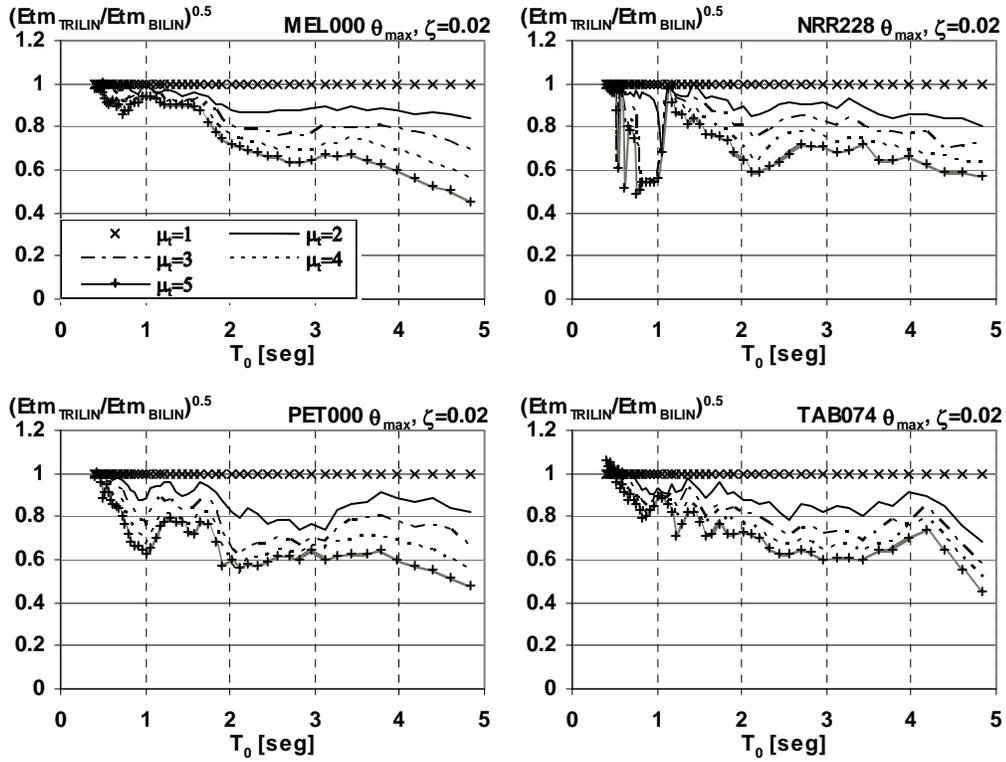


Figura AV.3c Energía total máxima de colapso. Terreno cercano, suelo (CS),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{max}$ .

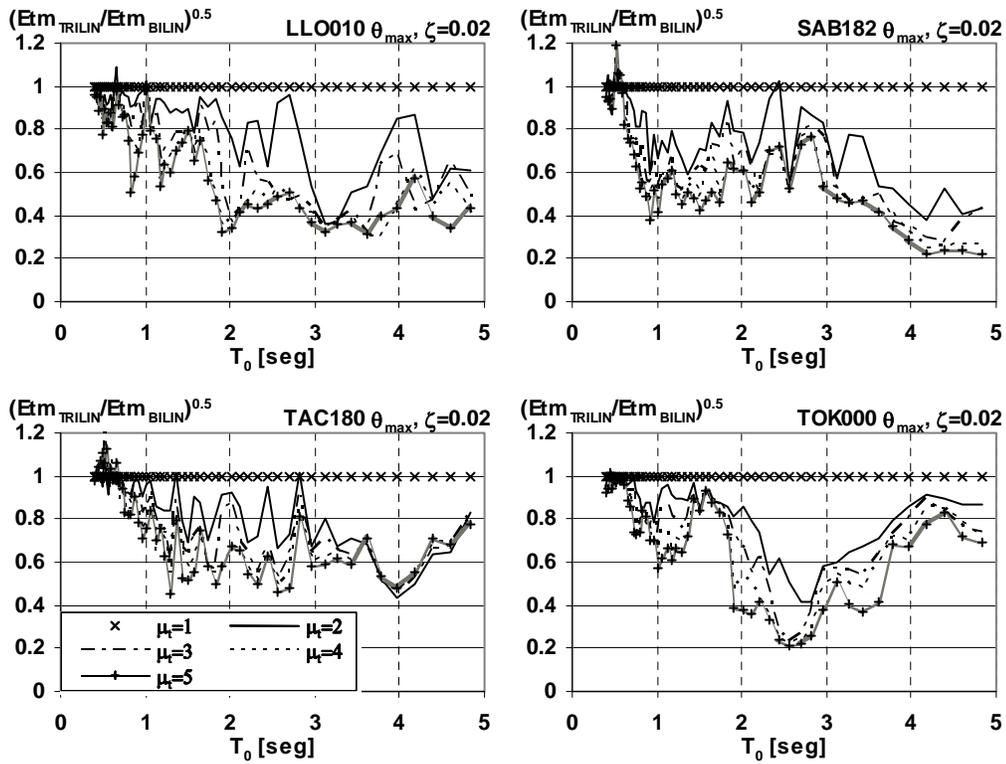
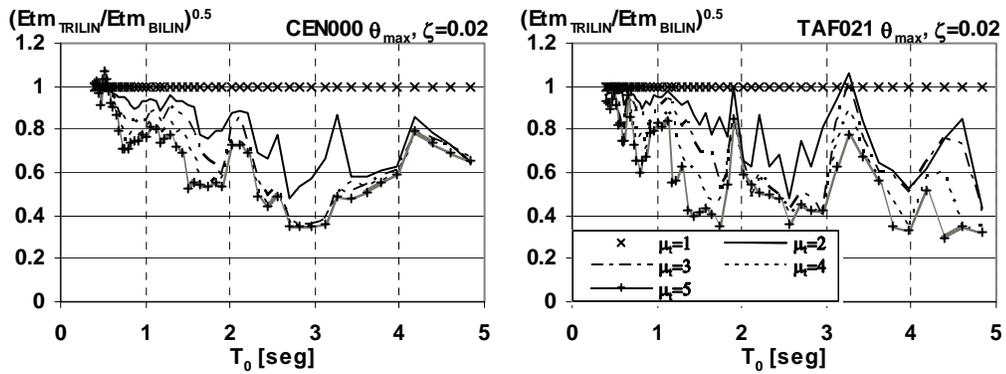
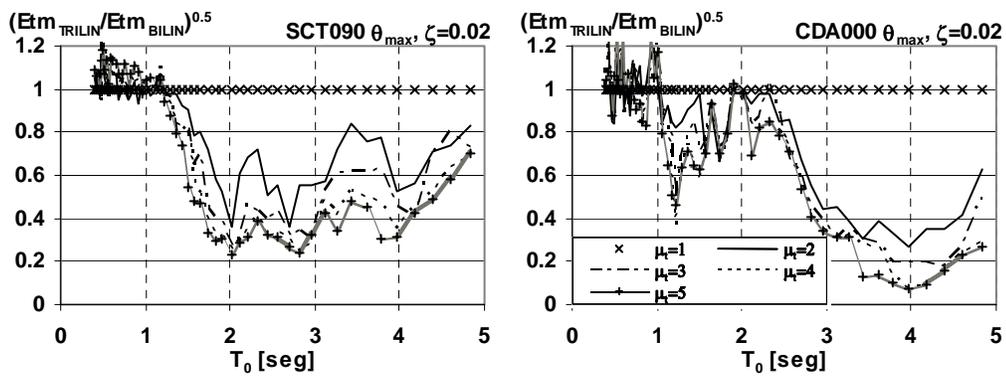


Figura AV.3d Energía total máxima de colapso. Terreno lejano, suelo (LS),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{max}$ .



**Figura AV.3e** Espectros de energía total máxima de colapso. Registros CEN y TAF (clasificables en tipo LR),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{max}$ .



**Figura AV.3f** Espectros de energía total máxima de colapso. Registros SCT y CDA (clasificables en tipo LS),  $\zeta=0.02$ ,  $\theta_{max}$ .

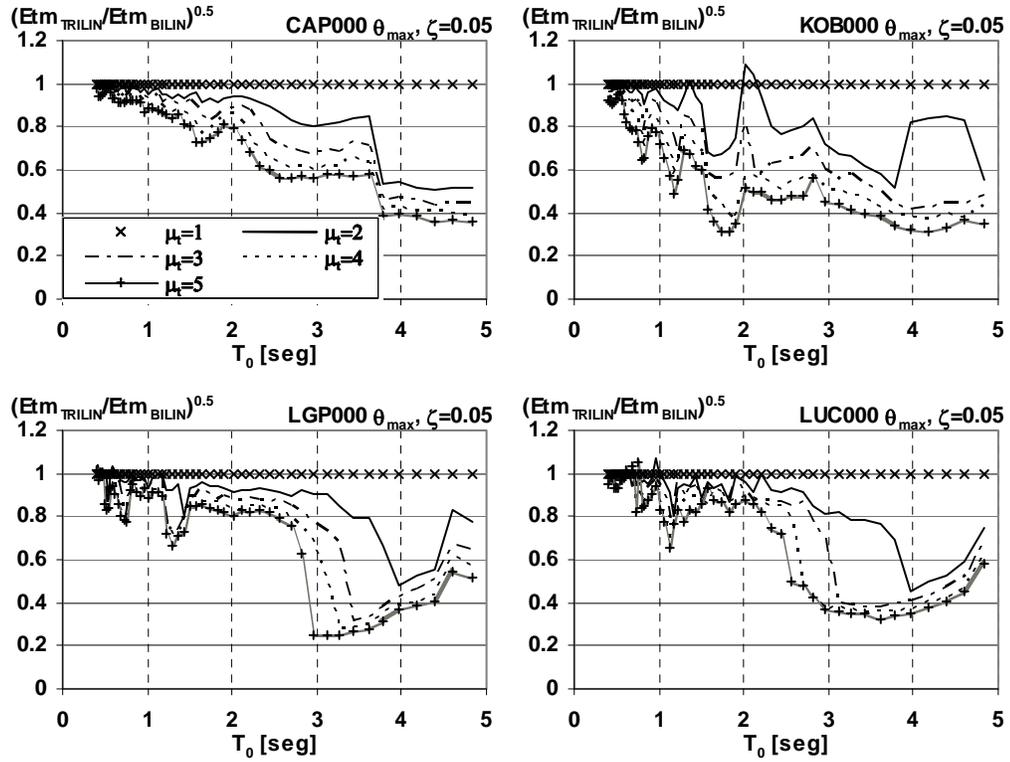


Figura AV.4a Energía total máxima de colapso. Terreno cercano, roca (CR),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{max}$ .

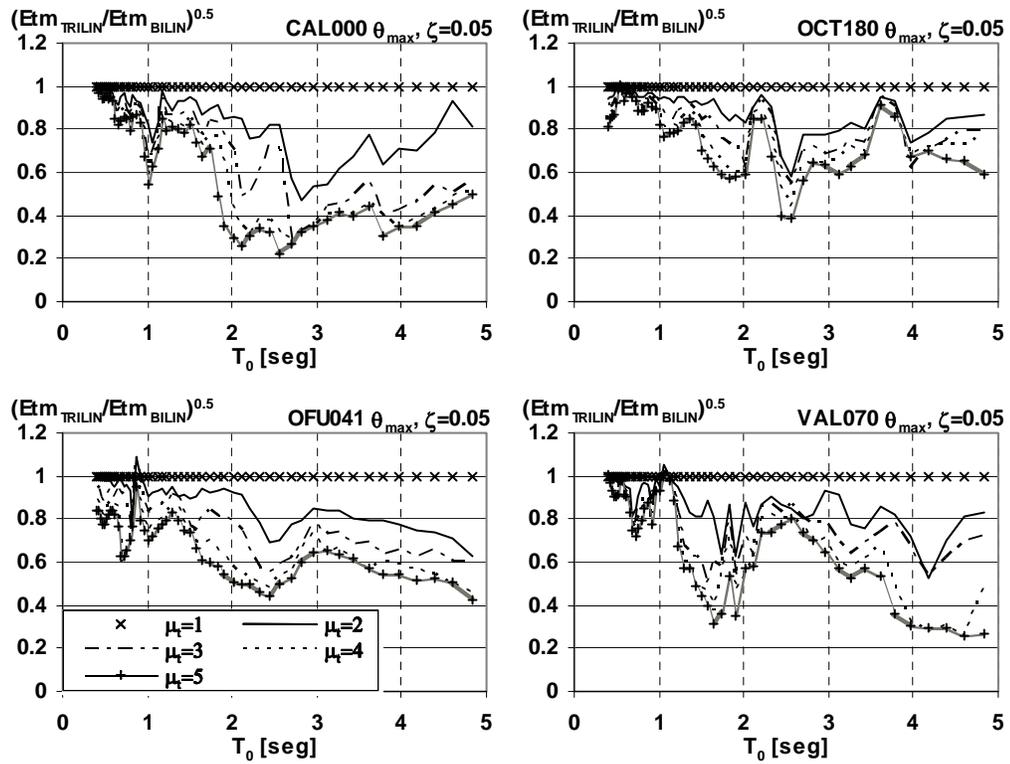


Figura AV.4b Energía total máxima de colapso. Terreno lejano, roca (LR),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{max}$ .

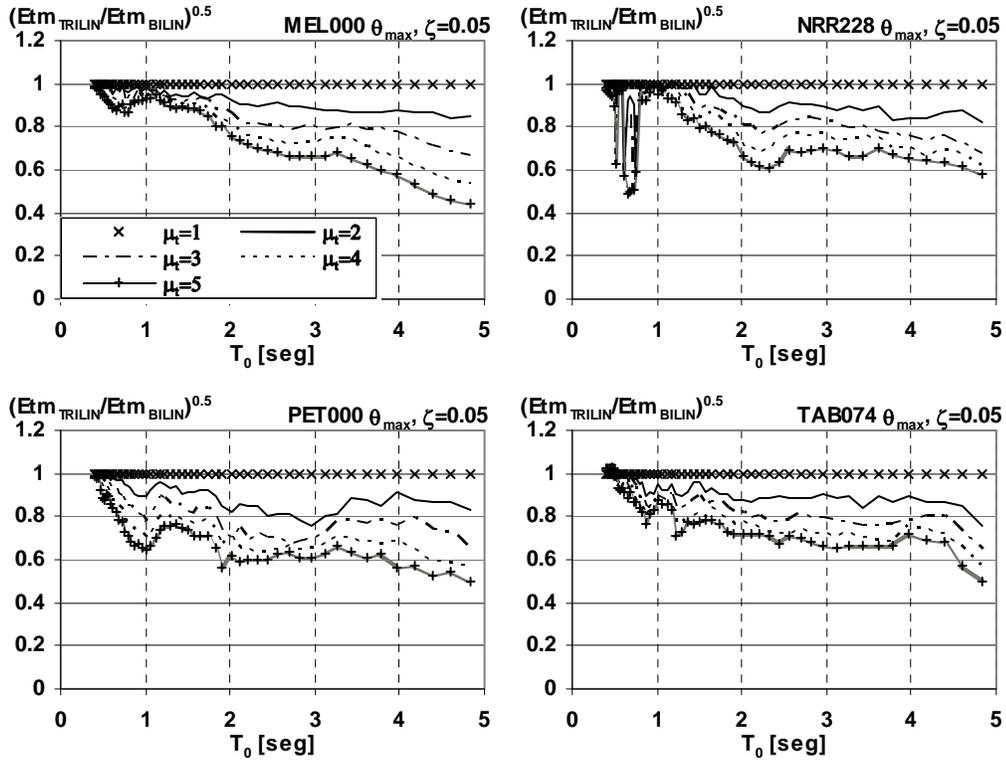


Figura AV.4c Energía total máxima de colapso. Terreno cercano, suelo (CS),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{max}$ .

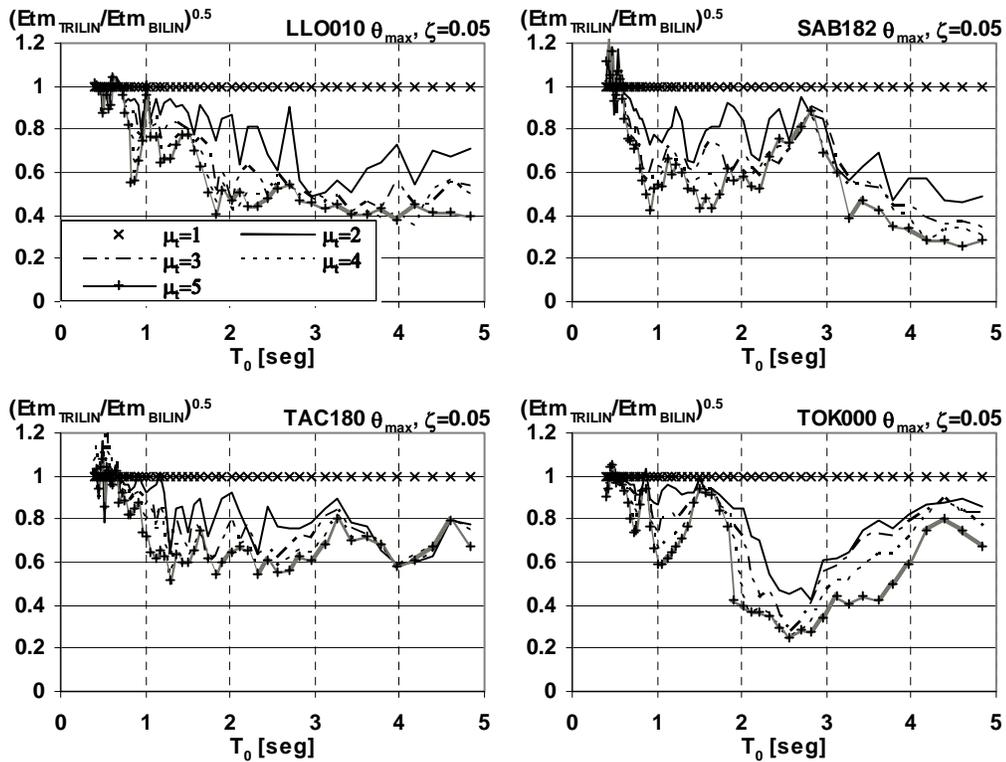
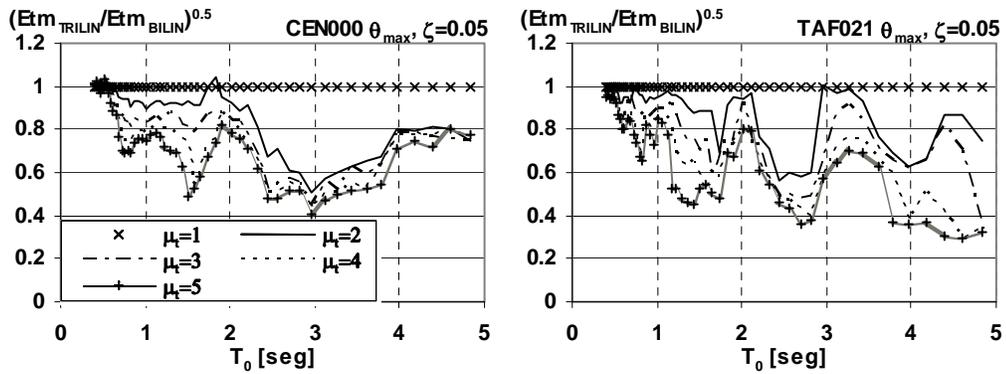
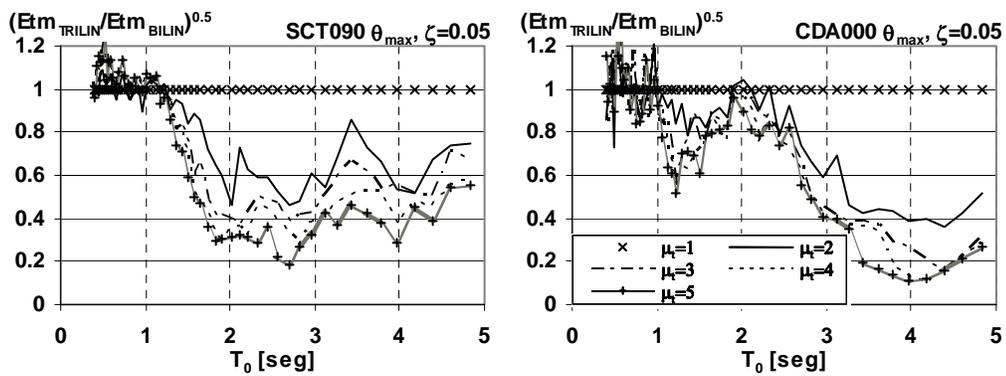


Figura AV.4d Energía total máxima de colapso. Terreno lejano, suelo (LS),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{max}$ .



**Figura AV.4e** Espectros de energía total máxima de colapso. Registros CEN y TAF (clasificables en tipo LR),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{max}$ .



**Figura AV.4f** Espectros de energía total máxima de colapso. Registros SCT y CDA (clasificables en tipo LS),  $\zeta=0.05$ ,  $\theta_{max}$ .