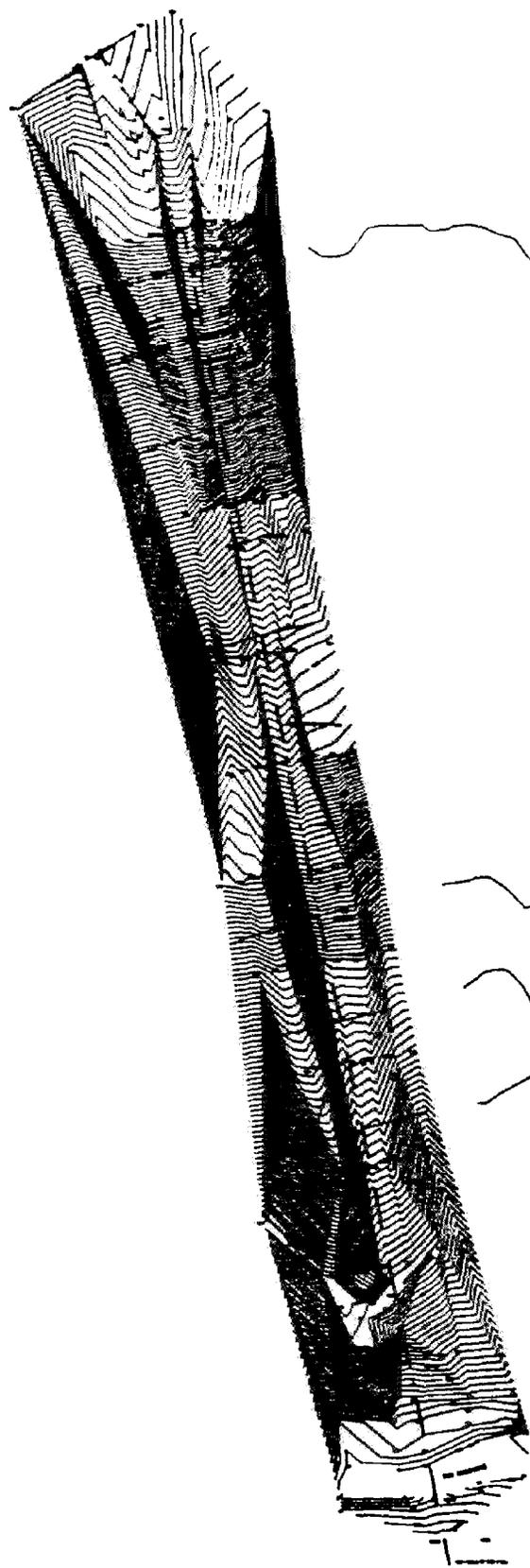


ANEXO No. 1
TOPOGRAFIA DEL SITIO
Y
UBICACIÓN DE SECCIONES



PERFIL 4

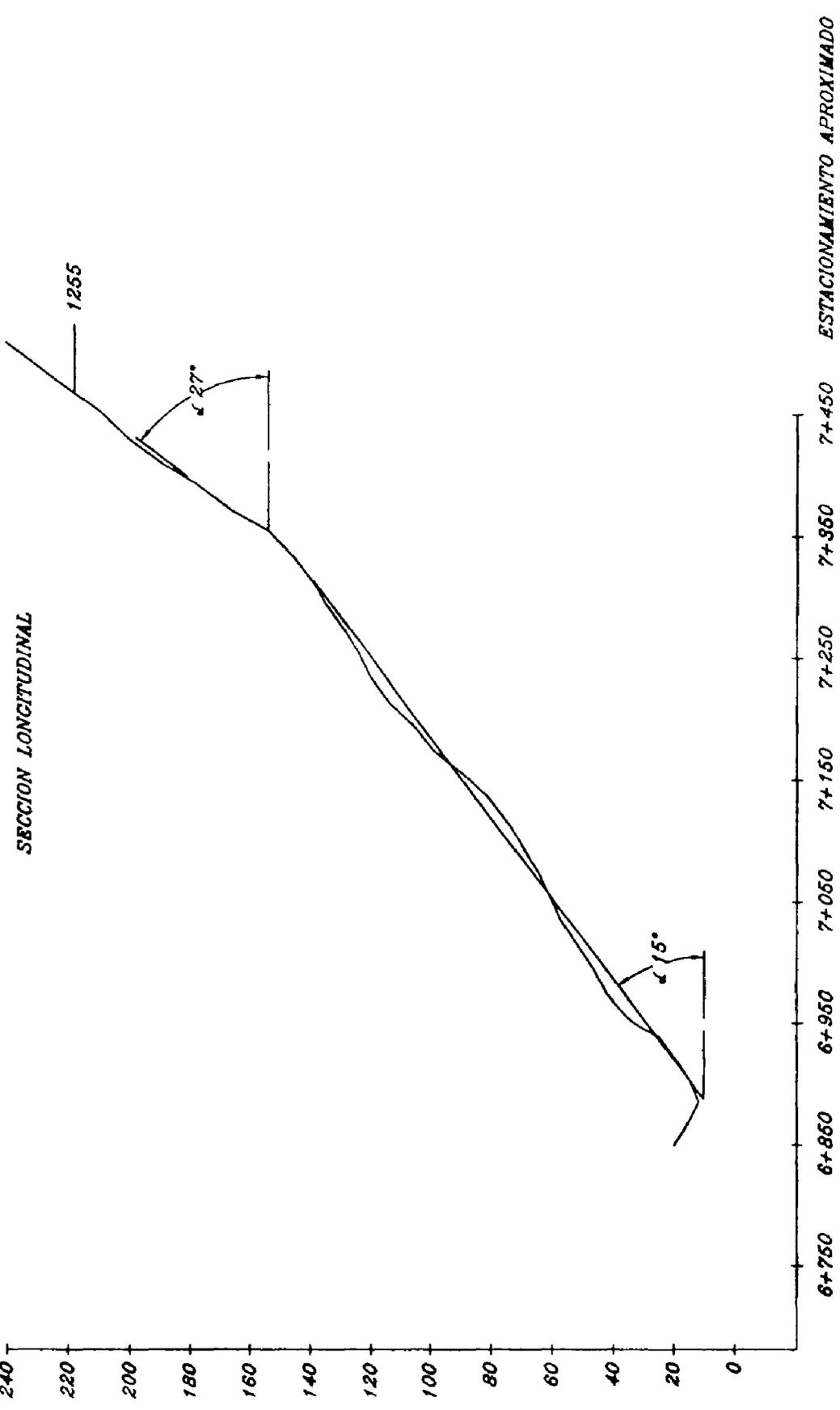
PERFIL 1

PERFIL 2

PERFIL 3

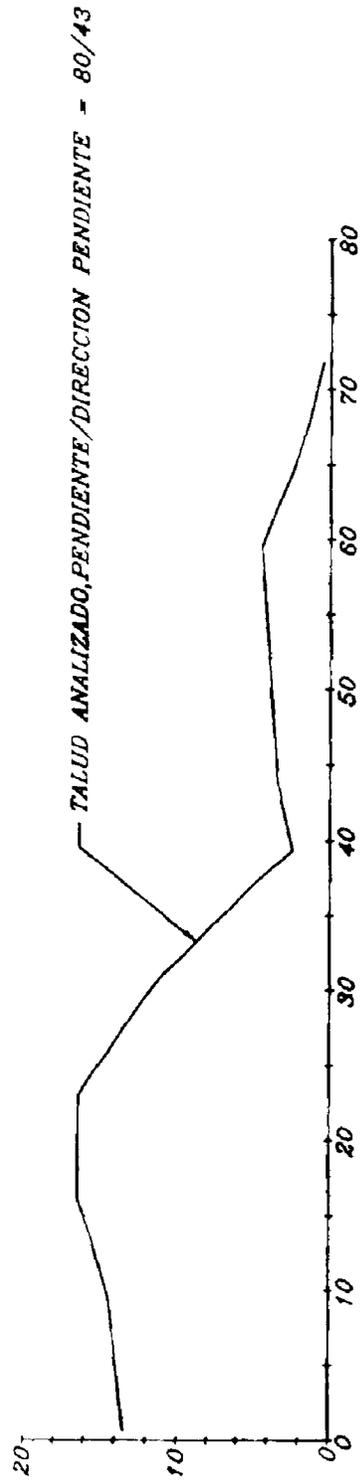
ANEXO No. 2
PERFILES ANALIZADOS

PROYECTO OROSI
ESTABILIDAD DE TALUDES
MARGEN IZQUIERDA RIO NAVARRO

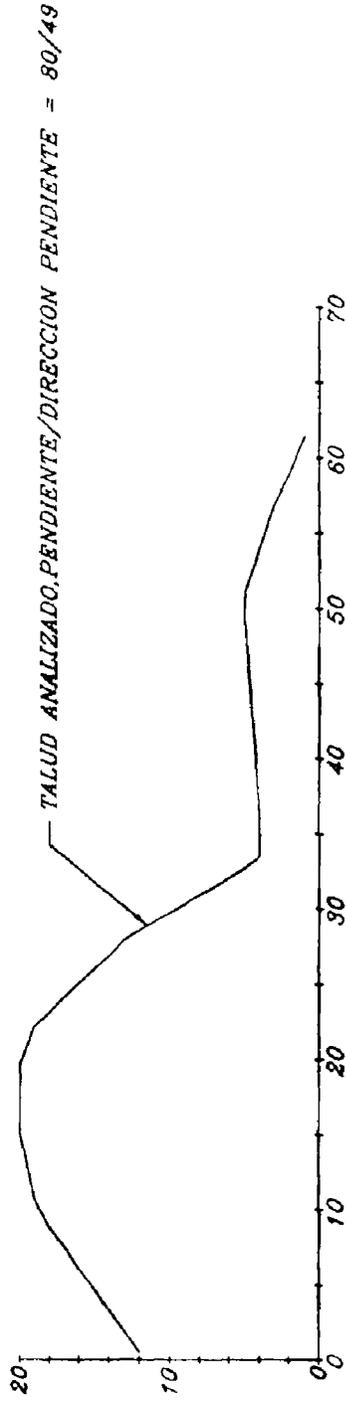


PROYECTO OROSI
SECCION TRANSVERSAL No 1

ESTACIONAMIENTO 6+875 APROXIMADO

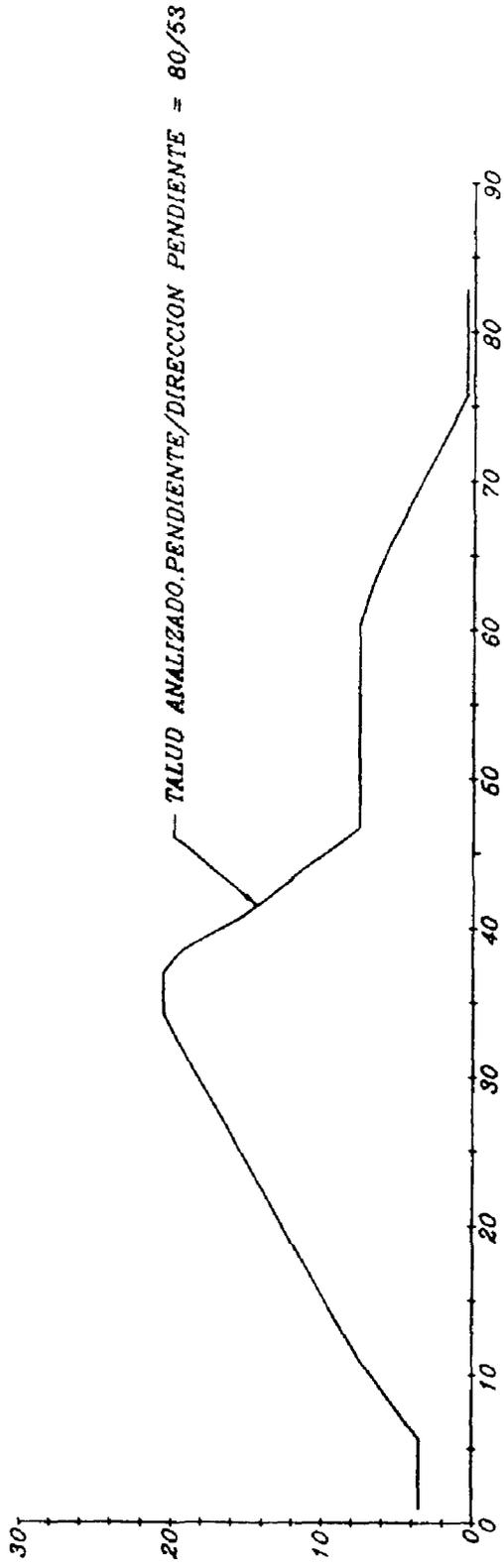


PROYECTO OROSI
SECCION TRANSVERSAL No 2
ESTACIONAMIENTO 6+940 APROXIMADO

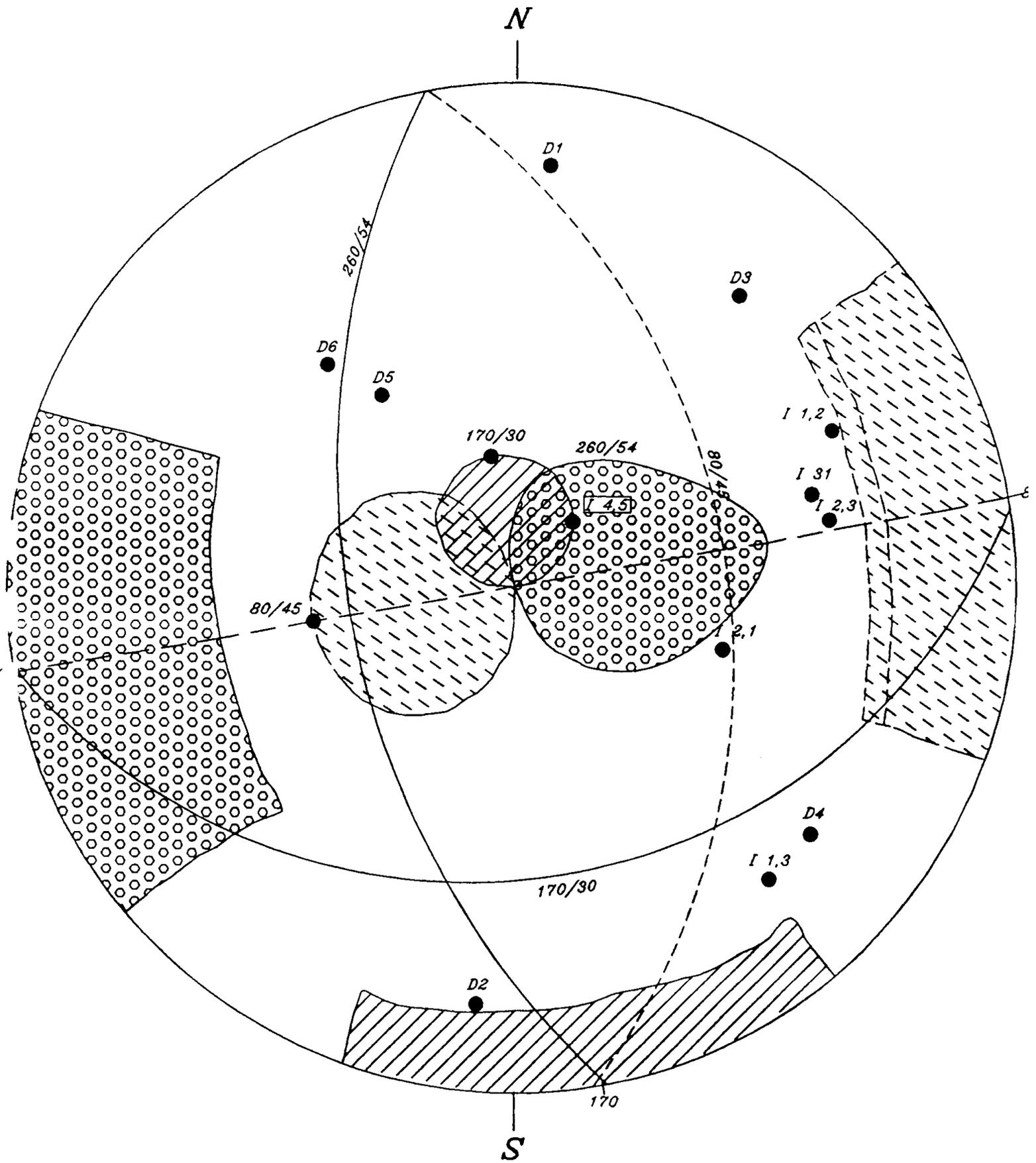


PROYECTO OROSI
SECCION TRANSVERSAL No 3

ESTACIONAMIENTO 7+000 APROXIMADO



ANEXO No. 3
PROYECCIÓN ESTEREOGRAFICA

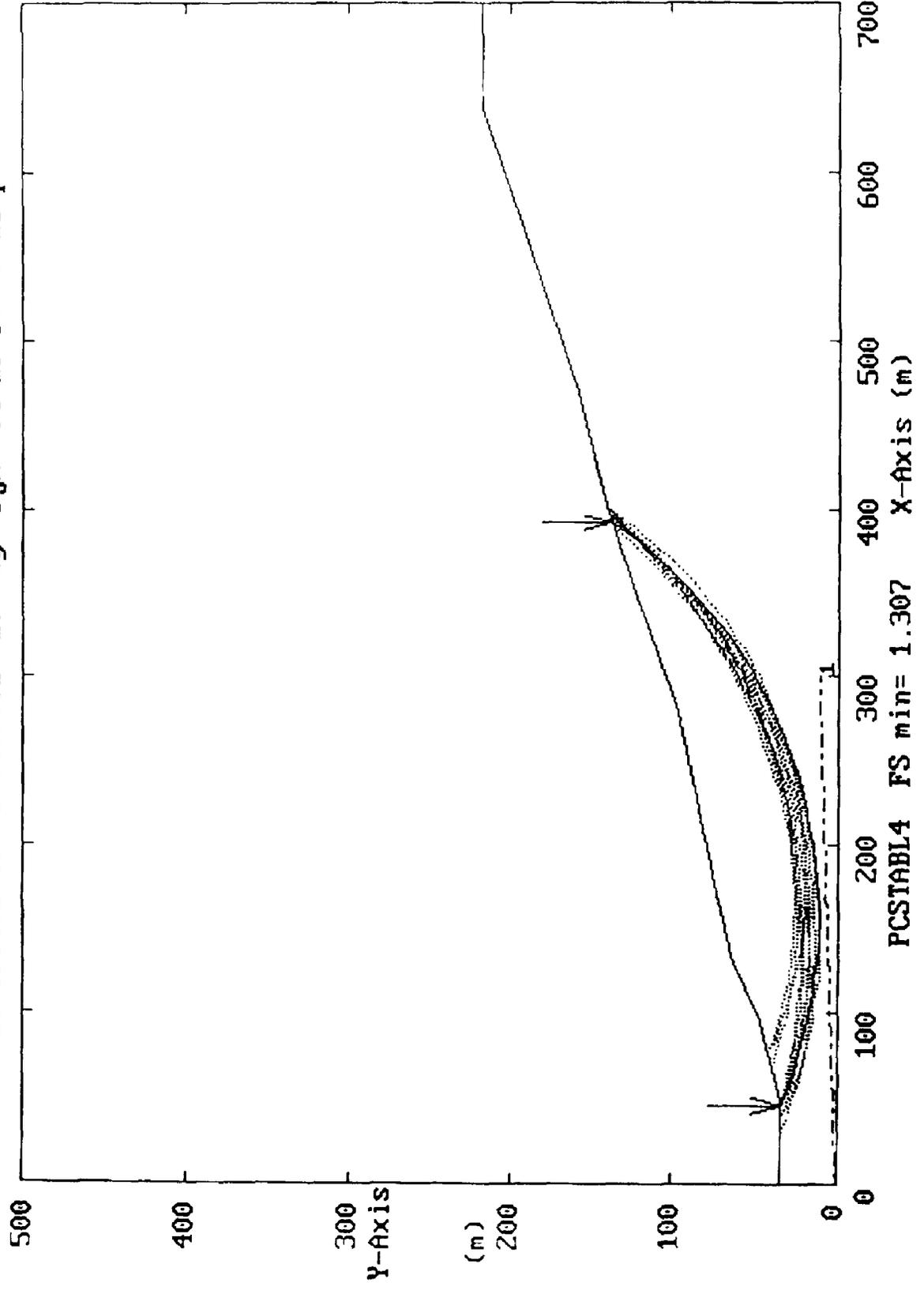


PROYECTO OROSI
ESTABILIDAD DE TALUDES
MARGEN IZQUIERDA RIO NAVARRO
 PROYECCION ESTEREOGRAFICA

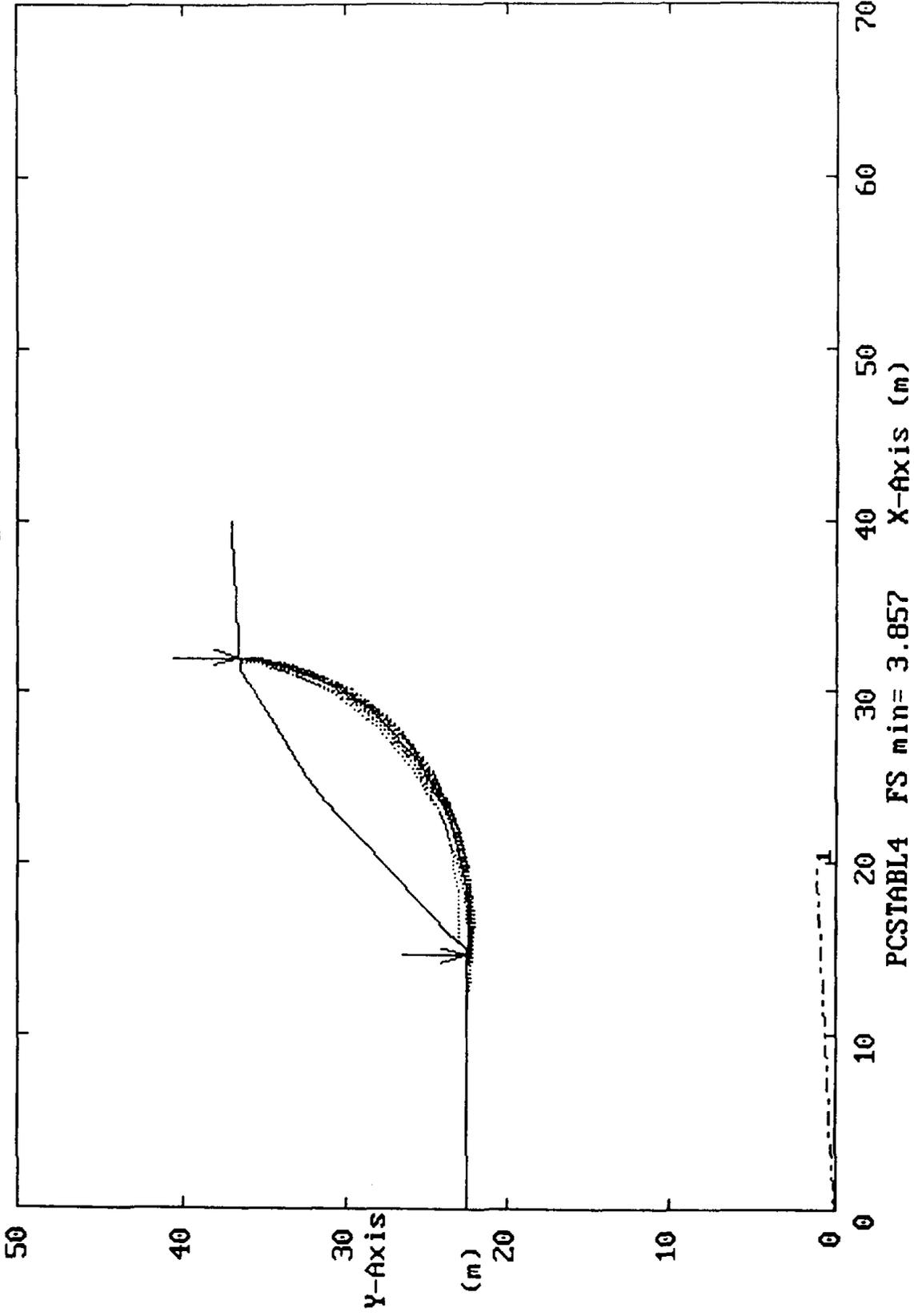
ANEXO No. 4

SALIDAS PROGRAMAS PCSTABL5

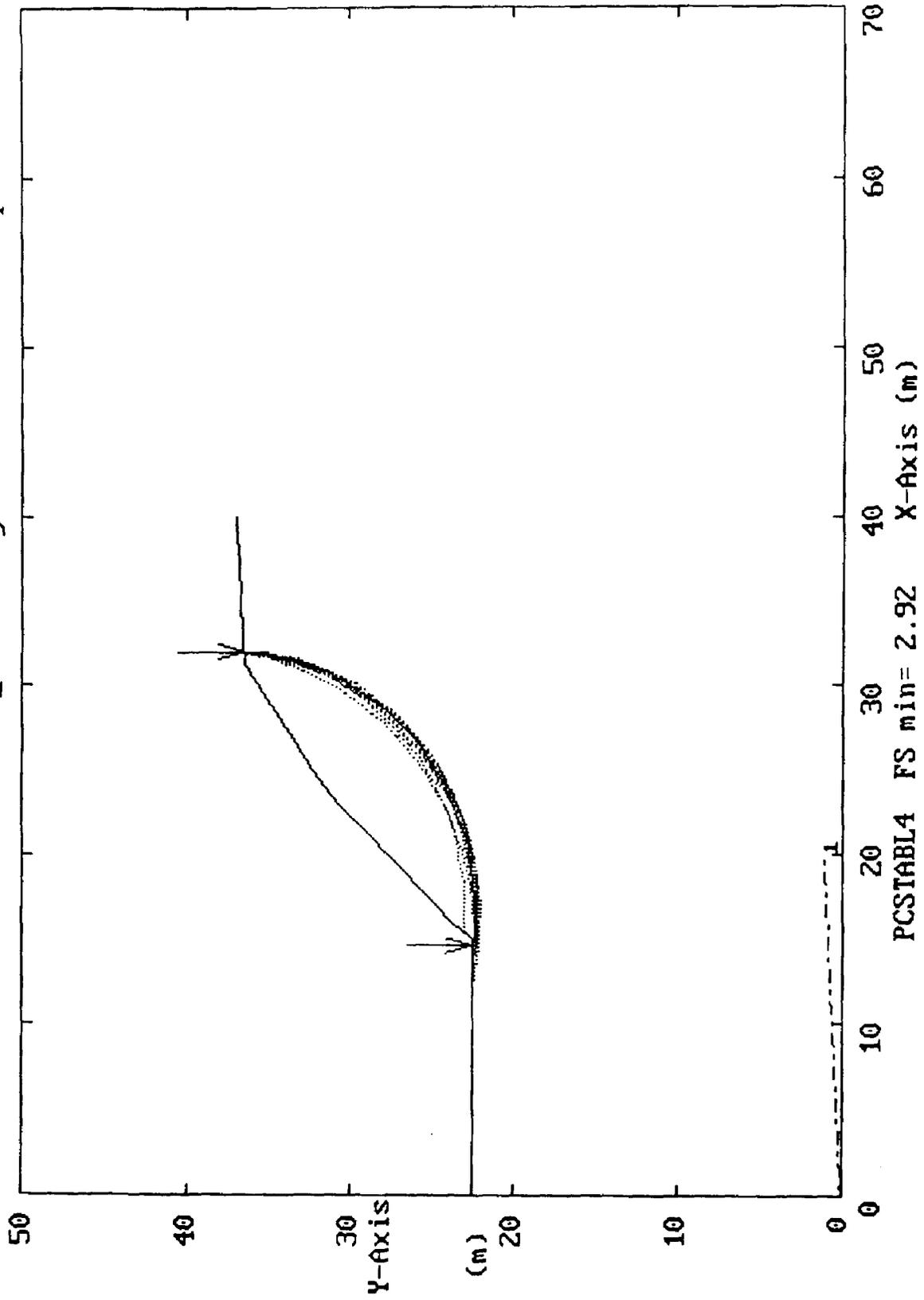
ACUEDUCTO OROSI - Perfil longitudinal SISMO, AGUA
Ten Most Critical. C:OROSI01.PLT By: rjm 04-19-98 1:16 pm



Ten Most Critical. C:OPT1_01.PLT By: 04-18-98 1:38 pm

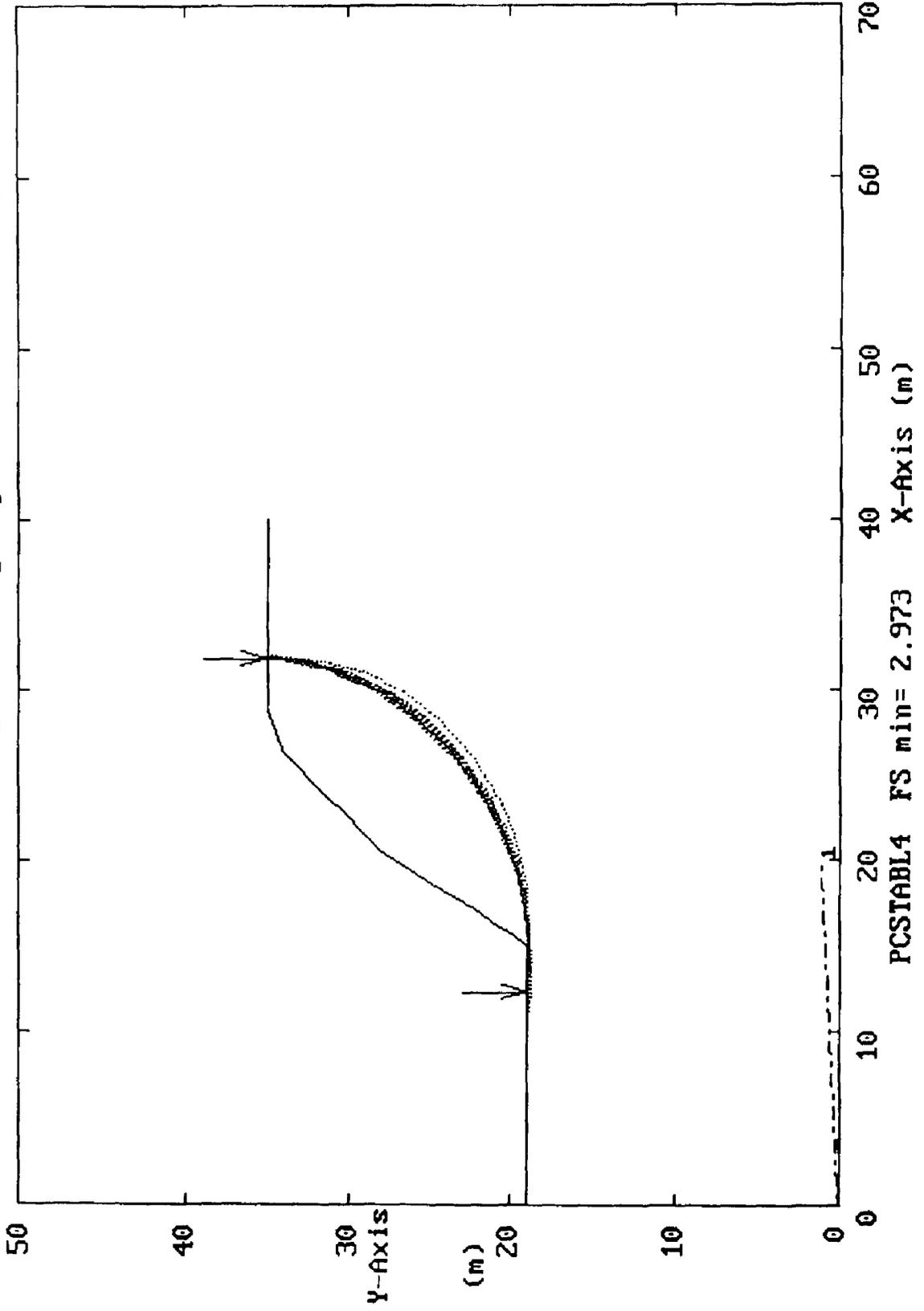


Perfil transu.1 Con sismo
Ten Most Critical. C:OPT1_02.PLT By: 04-18-98 1:41 pm

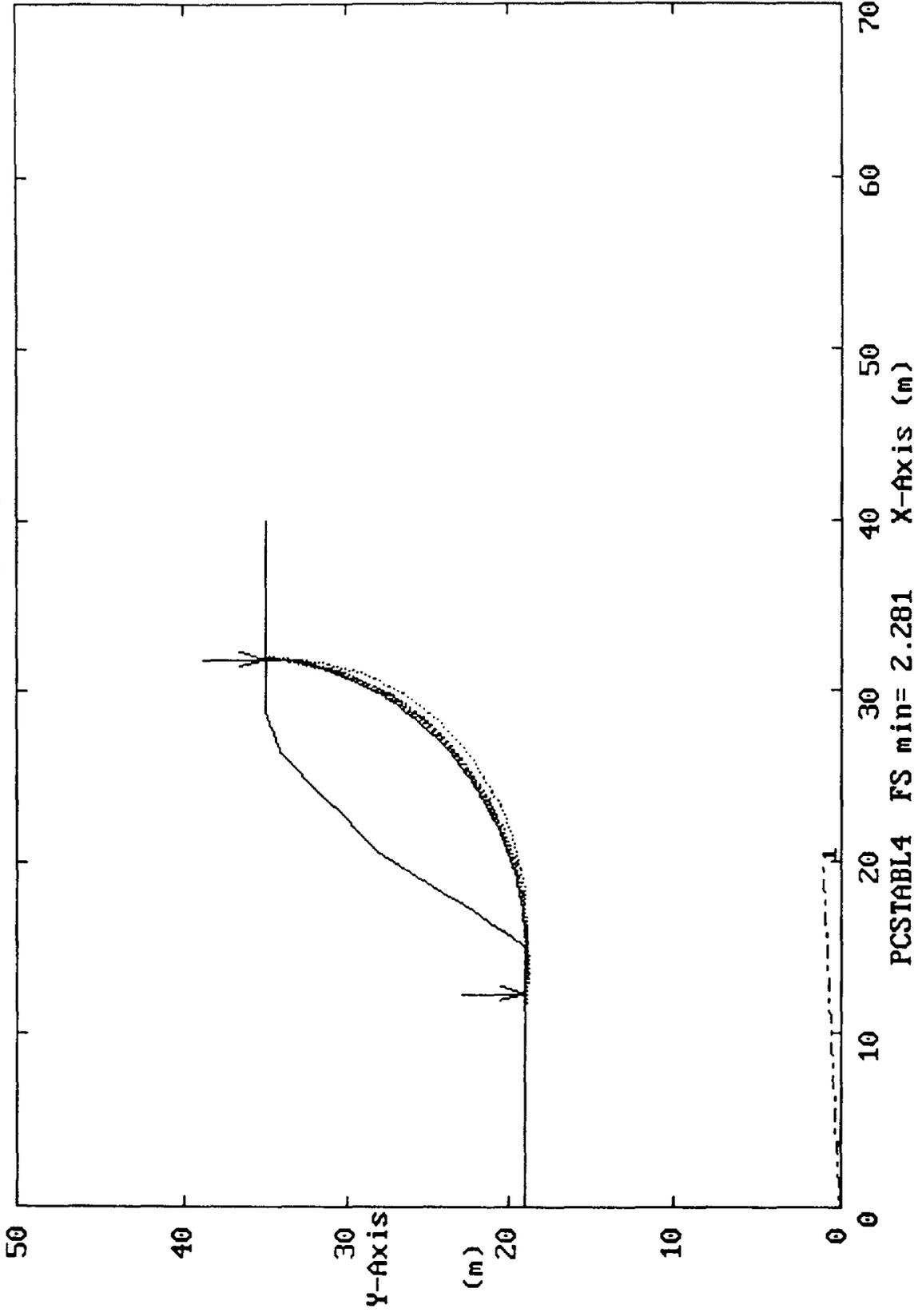


Ten Most Critical. C:OPT2_01.PLT By: rjm 04-18-98 1:48 pm

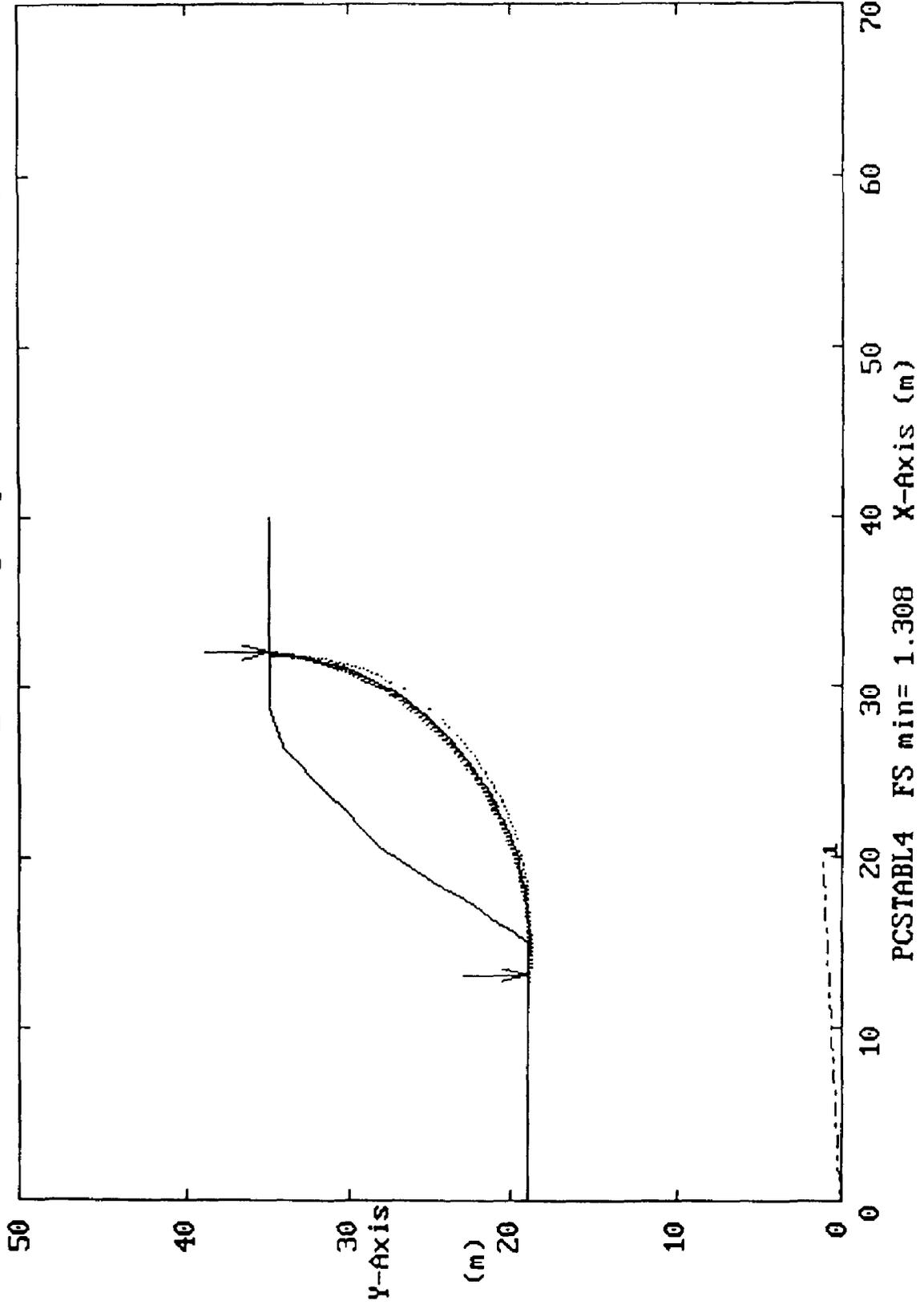
Perfil transu.2



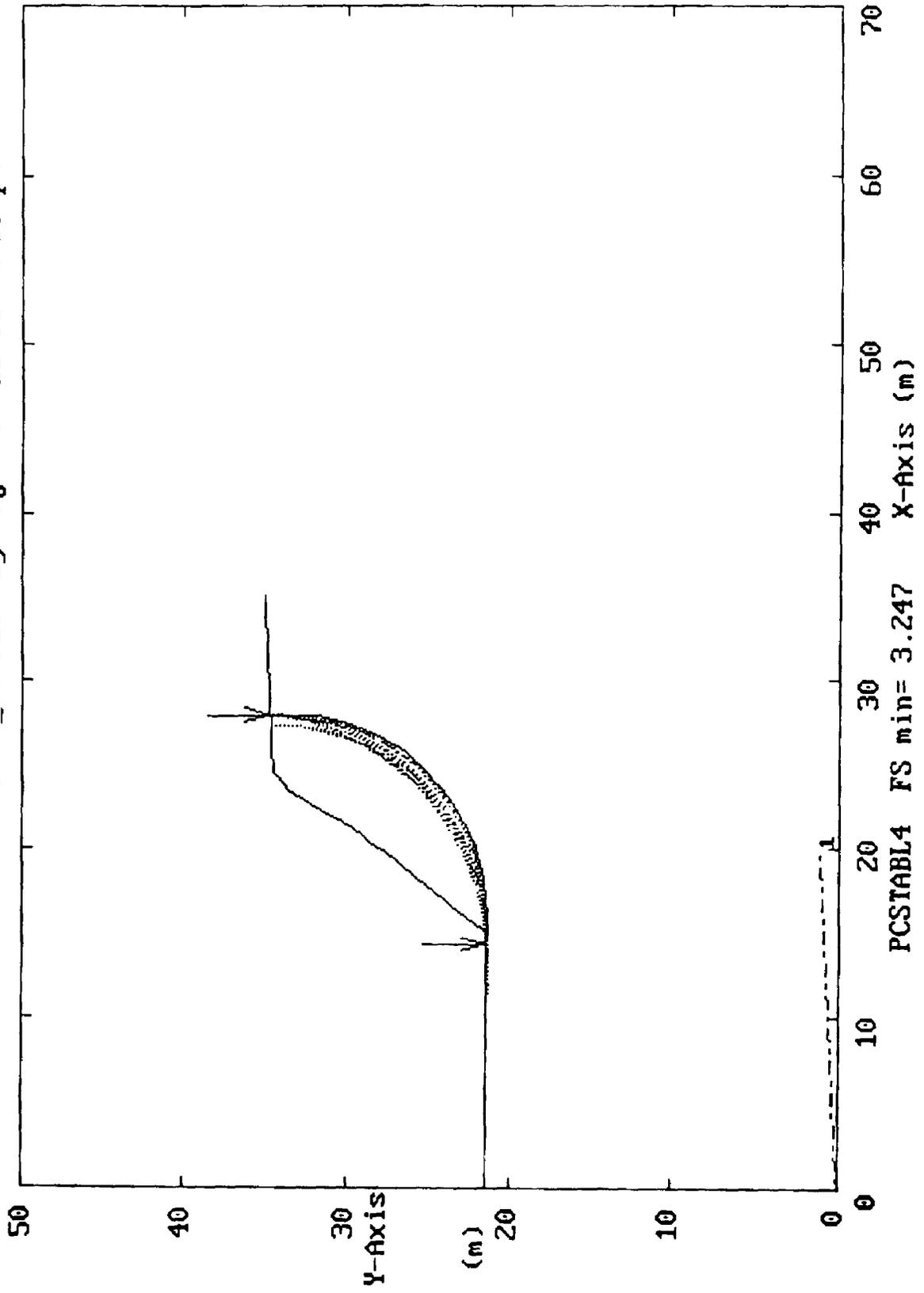
Ten Most Critical. Perfil transu.2 con sismo
C:OPT2_02.PLT By: rjm 04-18-98 1:49 pm



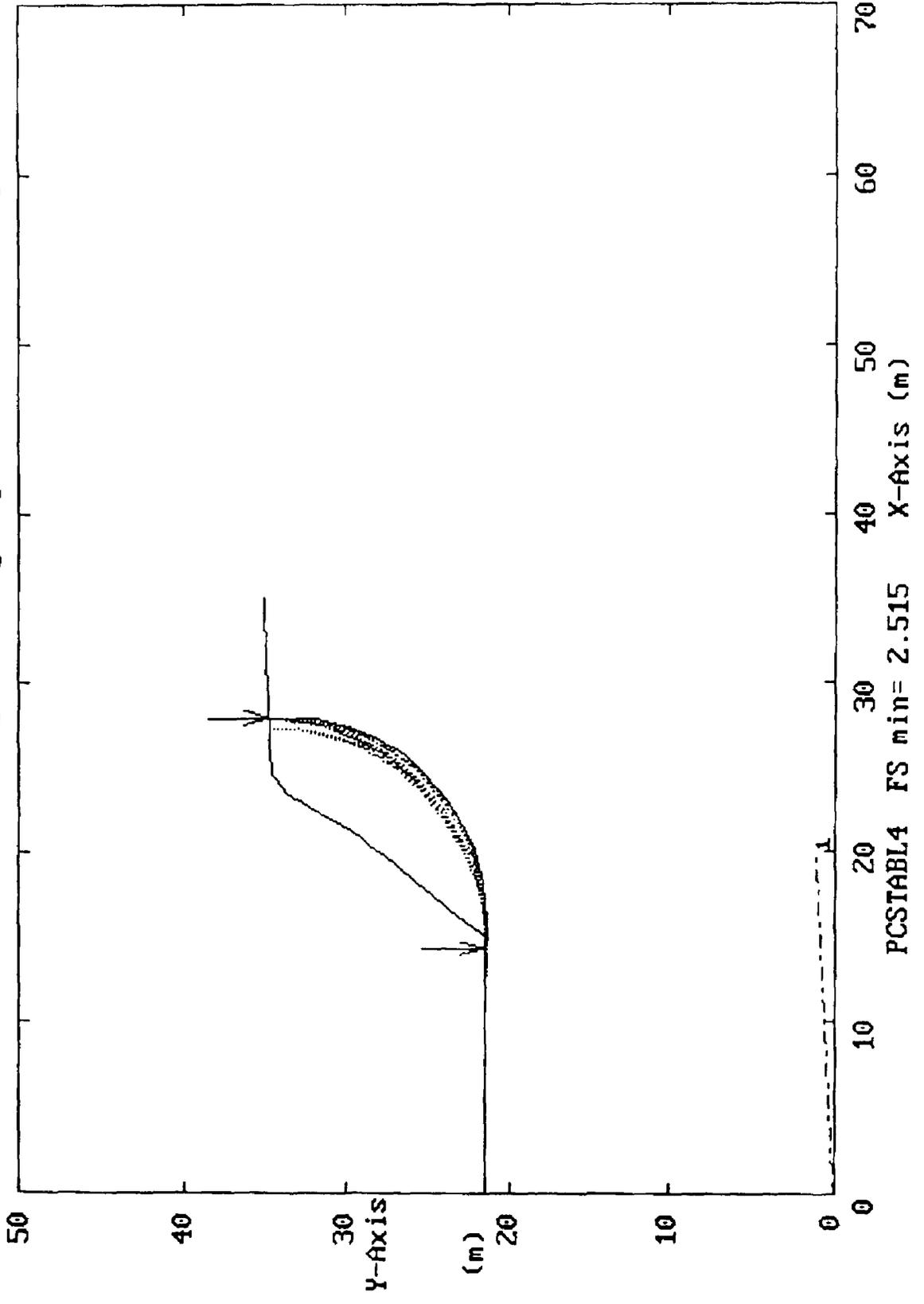
Perfil transu.2 con sismo, c=5T/m2
Ten Most Critical. C:OPT2_03.PLT By: rjm 04-18-98 1:50 pm



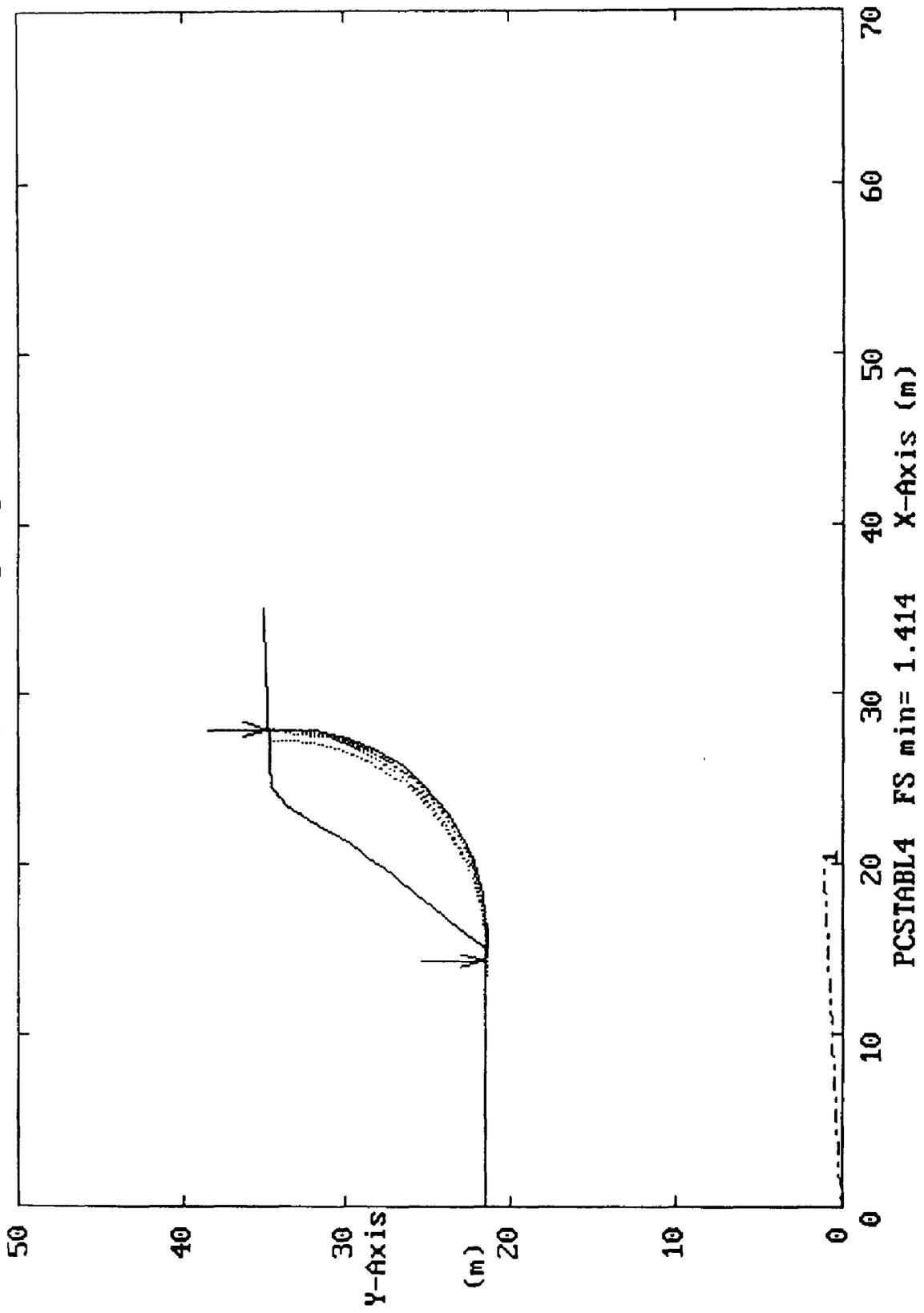
Ten Most Critical. Perfil transu.3
C:OPT3_01.PLT By: rjm 04-18-98 1:56 pm



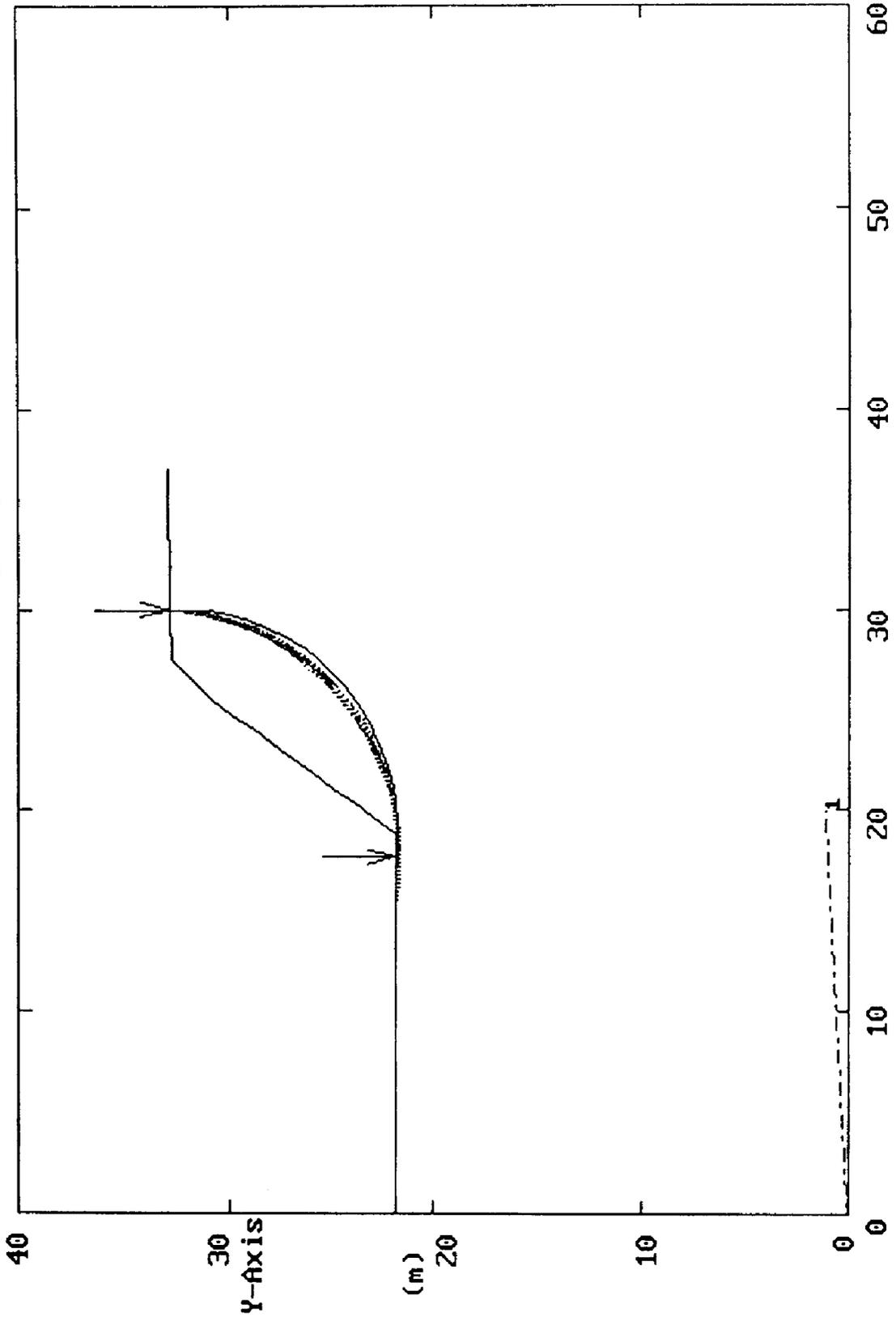
Ten Most Critical. C:OPT3_02.PLT By: rjm 04-18-98 1:57 pm



Perfil transu.3 con sismo, c=5T/m2
Ten Most Critical. C:OPT3_03.PLT By: rjm 04-18-98 1:58 pm

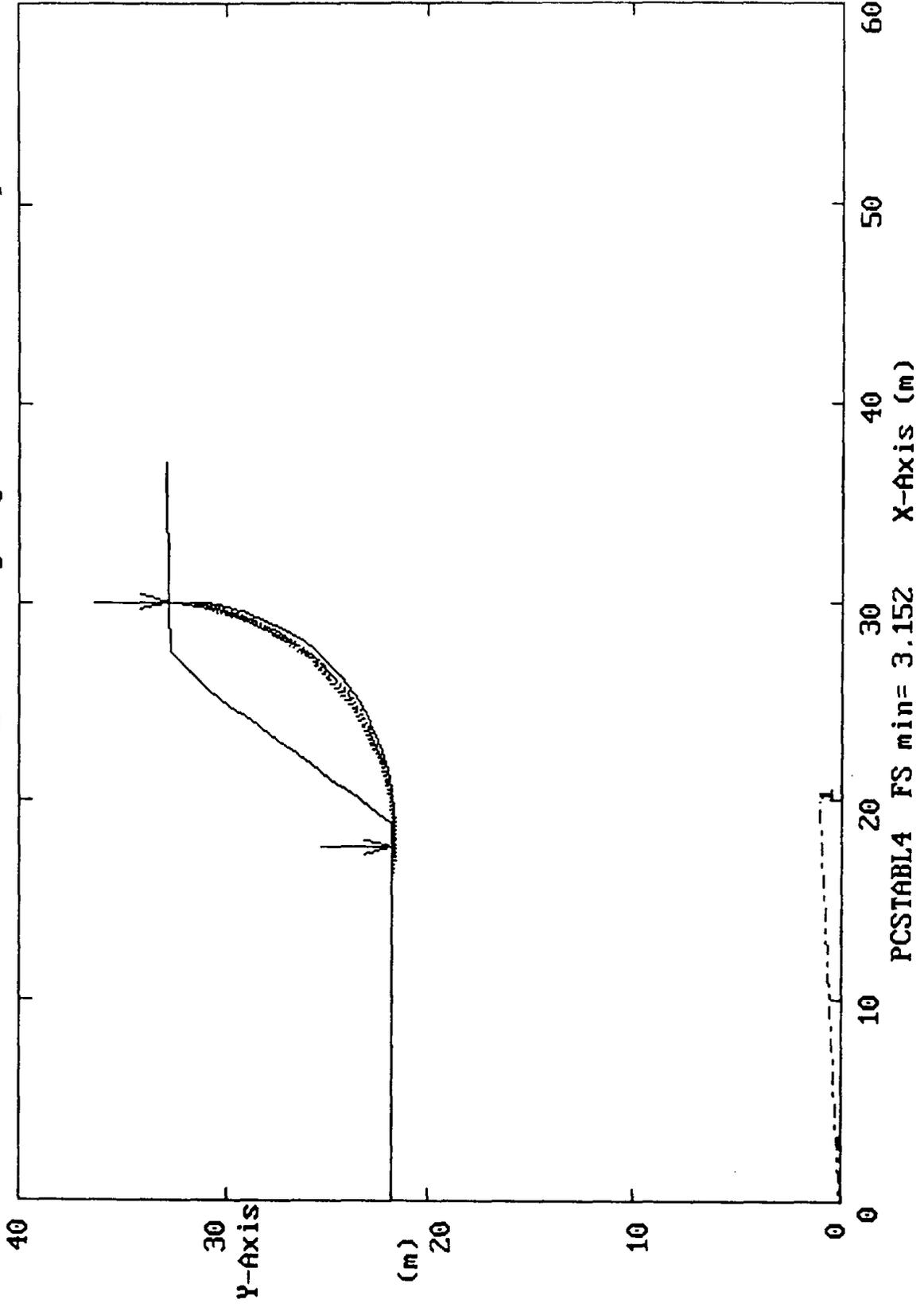


Ten Most Critical. C:OPT4_01.PLT By: rjm 04-18-98 2:02 pm

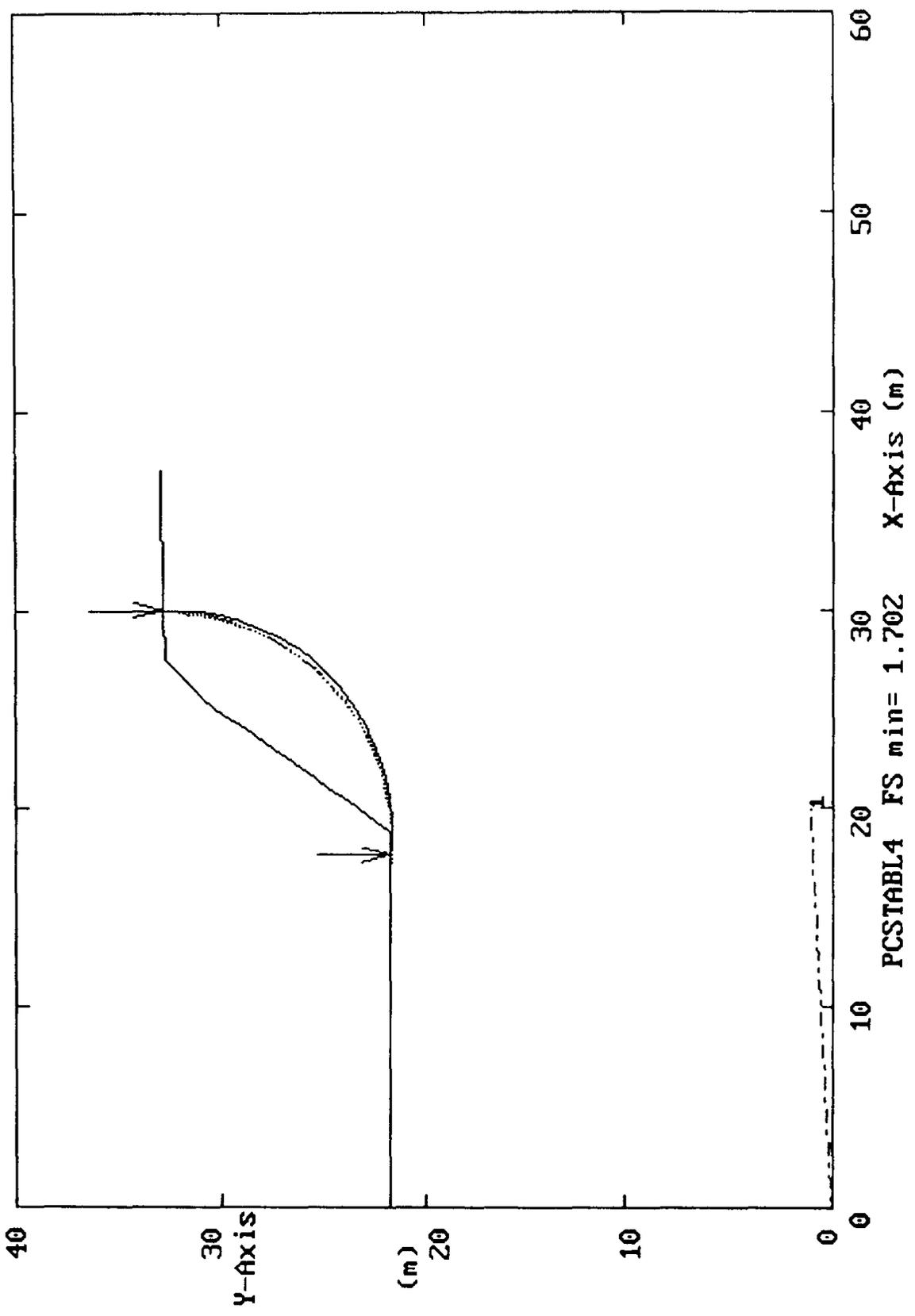


PCSTABL4 FS min= 4.041

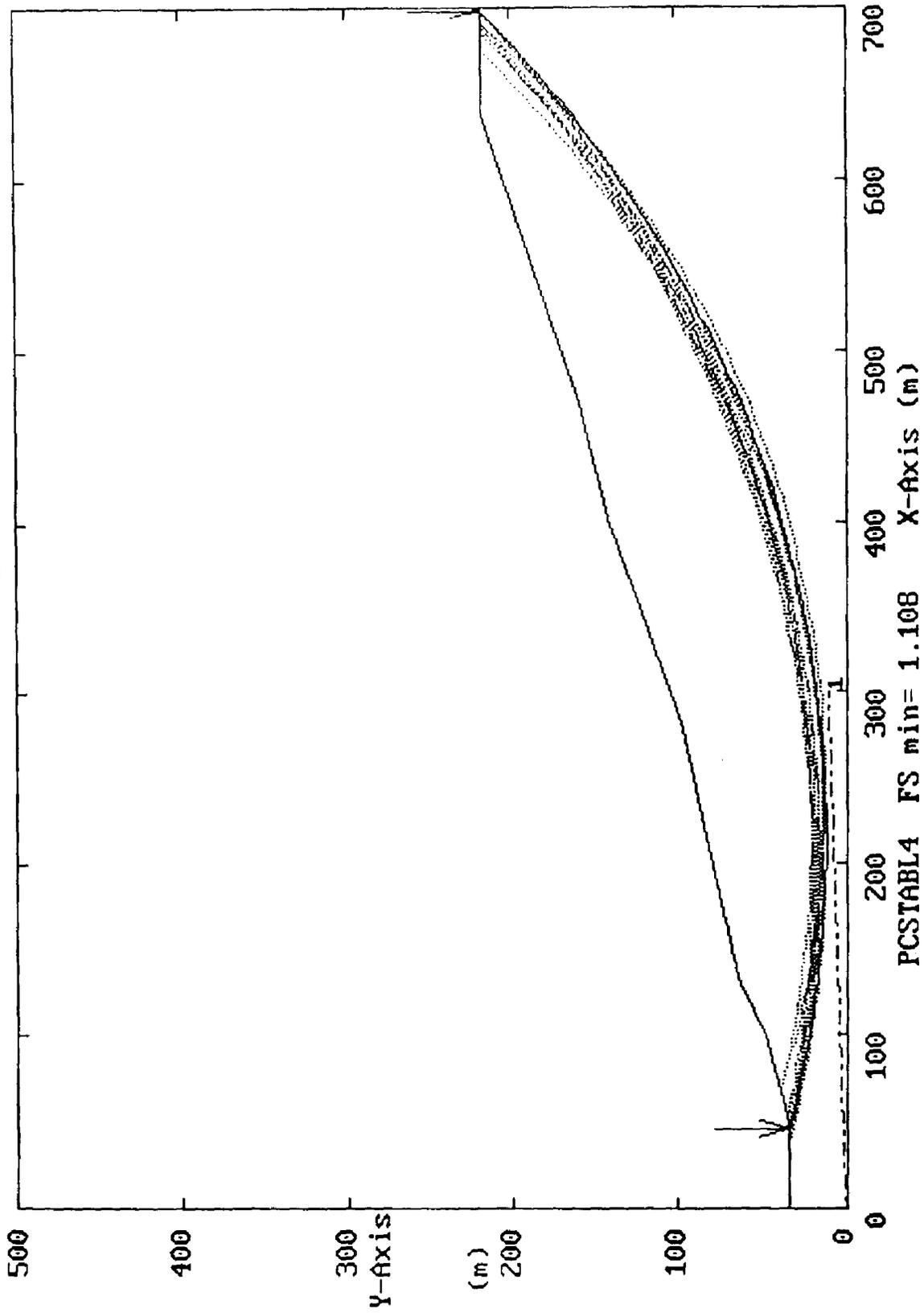
Ten Most Critical. Perfil transu.4 con sismo
C:OPT4_02.PLT By: rjm 04-18-98 2:03 pm



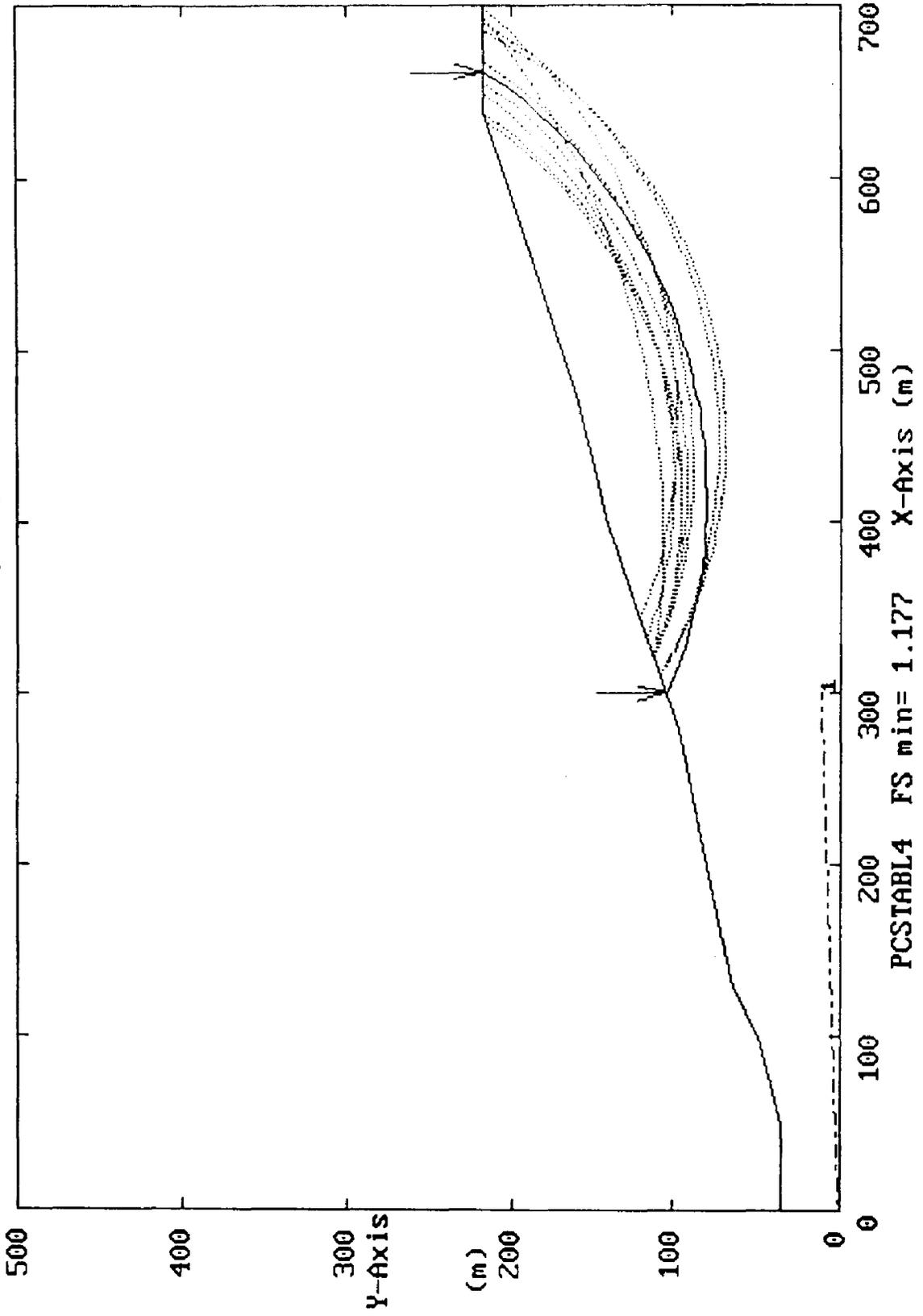
Perfil transu.4 con sismo, c=5 T/m2
Ten Most Critical. C:OPT4_03.PLT By: rjm 04-18-98 2:04 pm



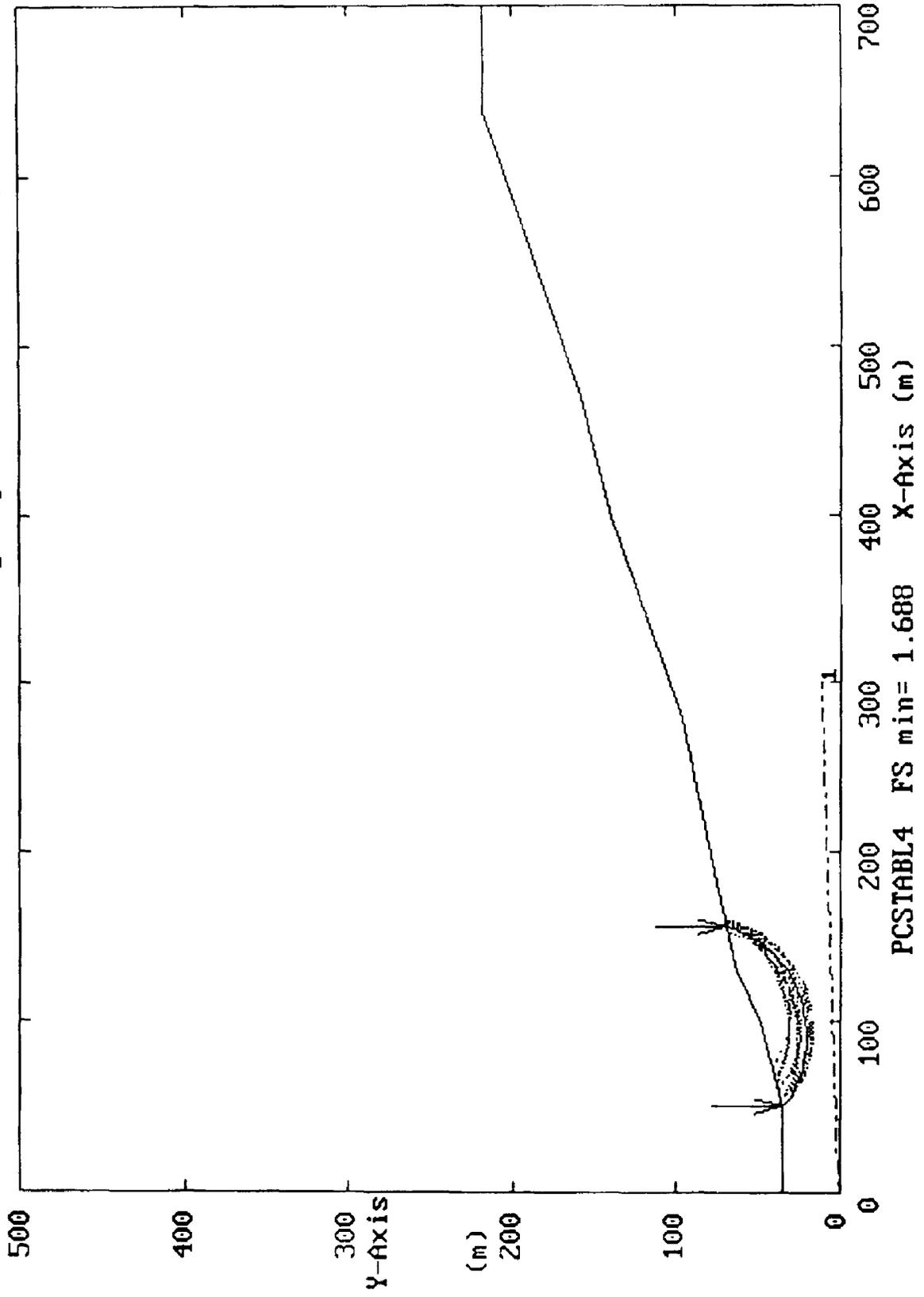
ACUEDUCTO OROSI - Perfil longitudinal SISMO, AGUA
Ten Most Critical. C:OROSI02.PLT By: rjm 04-19-98 1:18 pm



ACUEDUCTO OROSI - Perfil longitudinal SISMO, AGUA
Ten Most Critical. C:OROSI03.PLT By: rjm 04-19-98 1:19 pm



ACUEDUCTO OROSI - Perfil longitudinal SISMO, AGUA
Ten Most Critical. C:OROSI04.PLT By: rjm 04-19-98 1:21 pm



6.0 EVALUACION ESTRUCTURAL DE LA CONDUCCION

6.1 Alcance

Realizar el análisis estructural de la conducción existente evaluando el comportamiento del acueducto bajo las condiciones de operación normal y excepcional, considerando éste último como la derivada de la ocurrencia de un movimiento fuerte del terreno como resultado del rompimiento de la falla Navarro.

En caso de que el análisis estructural de las condiciones actuales no cumpla a satisfacción con los parámetros mínimos permisibles, proponer y desarrollar la solución tal que satisfaga los requerimientos actuales.

6.2 Antecedentes

Diversos estudios previos a la actual consultoría (Geomatrix 1994, Silva 1994) han mostrado inquietud con respecto a la posibilidad de falla del acueducto Orosi, particularmente en la zona del sifón invertido (cruce del río Agua Caliente) así como el tramo en el que la conducción cruza la falla Navarro y sus ramales, pero sin llegar a conclusiones importantes sobre la posibilidad de ocurrencia de la misma.

Es por ello que el Instituto Costarricense de Acueductos y Alcantarillados (AyA) ha solicitado al Instituto Costarricense de Electricidad (ICE) la elaboración del estudio de vulnerabilidad sísmica de la conducción para la margen izquierda del río Agua Caliente de la que esta evaluación estructural forma parte integral.

Previo al análisis estructural y como una primera parte de este estudio se analizó la falla Navarro concluyéndose que efectivamente la misma presenta un riesgo para la conducción y estimándose las longitudes de rompimientos de las fallas (Alvarado 1997). Adicionalmente y como parte de este estudio se analizó el impacto que un sismo de campo cercano tiene sobre el acueducto, estimándose las magnitudes de los mismos y los posibles desplazamientos horizontales y verticales a los que estaría sujeto el acueducto en este caso. También como parte del estudio se analizó el comportamiento del sistema desde el punto de vista geotécnico, derivándose de los estudios realizados antes y durante la construcción del acueducto los parámetros geotécnicos básicos.

6.3 Análisis del comportamiento estructural

Durante los sismos fuertes, las conducciones enterradas pueden experimentar movimientos significativos como resultado de una ruptura importante en las fallas que cruzan. Estos desplazamientos, algunos de gran magnitud, pueden ser causados entre otros por la presencia misma de las fallas, licuefacción y deslizamientos. Estos efectos pueden ser minimizados seleccionando un trazado de tal manera que se evite al máximo la presencia de

elementos que pueden ser susceptibles de causar problemas. Sin embargo, en zonas de alta sismicidad (caso concreto de Costa Rica y en especial el acueducto Orosi) es bastante difícil evitar la presencia de alguna de las condiciones de riesgo mencionadas.

En el caso del acueducto Orosi, la presencia de sistemas de fallamiento local (fallas Navarro y Orosi) en una conducción ya construida y en operación hacen que la revisión estructural de la misma deba ineludiblemente considerar la eventualidad de un gran sismo de campo cercano y sus implicaciones. Para esto se ha recurrido a análisis que consideran los esfuerzos y deformaciones en tuberías enterradas sujetas a grandes desplazamientos producidos por el rompimiento de fallas que cruzan la conducción, incluyendo la caracterización de la restricción que el material circundante a la conducción tiene sobre la misma. Se incorpora también el análisis de la interacción conducción – medio circundante considerando componentes de restricción longitudinal, transversal horizontal y transversal vertical así como la posibilidad de permitir que el material que esté construida la conducción se comporte, en esos eventuales casos de sismos fuertes, dentro del rango inelástico permitiendo deformaciones plásticas sin ruptura de la conducción.

La siguiente información básica fue necesaria para el análisis de la estabilidad estructural de conducciones enterradas en suelo:

CARACTERÍSTICAS GENERALES DE LA CONDUCCIÓN:

Diámetro de la conducción	:	1,10 m
Espesor de la conducción	:	19 mm
Tipo de acero de la conducción:		API – 5LX – 52 (margen izquierda del río Agua Caliente)
Esfuerzo mínimo a la fluencia	:	37 kg /mm ²
Envoltorio de presión máxima	:	52 kg/cm ²

CARACTERÍSTICAS GEOTÉCNICAS DE LA CONDUCCIÓN:

Cobertura mínima de suelo sobre la corona de la tubería	:	1,25 m
Peso unitario del material circundante a la conducción	:	20 kN/m ³
Ángulo de fricción interno del material circundante a la conducción	:	25°
Cohesión del material circundante a la conducción	:	1000 kPa

CARACTERÍSTICAS SÍSMICAS DE LA CONDUCCIÓN:

Ángulo de cruce de la falla con respecto a la conducción	:	$\beta = 70^\circ$ (máximo estimado)
Rompimiento estimado de la falla	:	30 cm (vertical y horizontal – máximos estimados)

Magnitud del sismo esperado	:	$M_s = 6,4$
Longitud libre entre bloques de anclaje que limiten el desplazamiento	:	460 m

Los análisis indicados muestran que bajo las condiciones normales de operación la conducción permite esfuerzos y deformaciones con un adecuado factor de seguridad ($FS > 2,3$). En el caso particular de un sismo de campo cercano los factores de seguridad con respecto al rompimiento estimado de la falla (30 cm) son superiores a 1,90 (metodología de Newmark – Hall) y 2,9 (metodología de Kennedy et. al) con deformaciones máximas del orden de 1,25% que se consideran adecuadas máxime que en todos los casos analizados, la conducción siempre se comporta dentro de su rango elástico alcanzando esfuerzos que no llegan nunca al esfuerzo de fluencia del acero utilizado en la construcción del mismo (ver tablas No. 1 y 2).

Asimismo, la revisión de la capacidad de la conducción en los puntos de anclaje considerados (estaciones 6 + 767 y 7 + 414) para sobrellevar los esfuerzos adicionales derivados de un rompimiento en la falla (estación 7 + 000) muestran que la tubería está en capacidad de absorber estos sobreesfuerzos sin falla con un factor de seguridad aceptable para esta condición excepcional (esfuerzos en tensión del orden de 50 kg/cm²).

TABLA No. 1
COMPARACIÓN ENTRE LOS DESPLAZAMIENTOS TEÓRICOS
MÁXIMOS PERMISIBLES Y REALES

	Esfuerzo maximo para análisis (kg/cm ²)	Desplazamiento Máximo permisible (cm)	Desplazamiento maximo real (cm)	Factor de Seguridad F.S.
Metodo de Kennedy et. al	5000	153	25	6,12
	3600	74	25	2,96
Método de Newmark – Hall	5000	252	10	25,2
	3600	40	21	1,90

TABLA No 2
COMPARACIÓN ENTRE LAS DEFORMACIONES TEÓRICAS
MÁXIMAS PERMISIBLES Y REALES

	Deformacion maxima	Deformación minima	Deformación real
Metodo de Kennedy et. al	1,8 %	1,14 %	0,22 %
Método de Newmark – Hall	—	—	1,23 %

6.4 Conclusiones y recomendaciones

Los estudios estructurales realizados al acueducto Orosi mediante el análisis de tuberías enterradas muestran que **las deformaciones reales (transversal horizontal y transversal vertical) calculadas para el rompimiento estimado de la falla Navarro (30 cm) son absorbidas eficazmente por la conducción sin daño esperado por cuanto, a pesar de que los análisis suponen como punto de inicio la posibilidad de que la tubena enterrada tenga deformaciones importantes que hagan que se sobrepase el punto de fluencia del acero y ésta entre en el rango plástico, esta situación no se espera que se de en el caso del acueducto Orosi (factores de seguridad en este caso superiores a 6).** Después de numerosos análisis, la conclusión es que en el caso de un rompimiento de la falla Navarro según las características estimadas en este informe y aún llegando al límite de fluencia del material (condición límite para deformaciones elásticas) los factores de seguridad son superiores en todos los casos a 1,9, que se consideran aceptables dada la condición excepcional del evento que motiva este análisis.

Del análisis de la información suministrada para la elaboración de esta consultoría se concluye que existen una serie de elementos en el talud a margen izquierda del río Agua Caliente que restringen la longitud libre para que la conducción se deforme elásticamente entre los dos bloques de anclaje de gran tamaño existentes (estaciones 6 +767 y 7 + 414) en el caso del rompimiento de la falla Navarro. Estos elementos son algunas pantallas utilizadas para control de aguas superficiales provocadas por la lluvia (escorrentías) así como una especie de monturas en los que la tubería está embebida. Esta consultoría es de la opinión que **para garantizar un comportamiento idóneo bajo las condiciones de evaluación utilizadas en este estudio, estos elementos intermedios fijos deben ser convenientemente removidos, garantizando de esta manera una adecuada capacidad de deformación del acueducto Orosi en el caso extremo de un sismo provocado por la falla Navarro.**

6.4 Referencias

Alvarado Induni, Guillermo: "Estudio de Vulnerabilidad Sísmica del Acueducto de Orosi. Parte I: Neotectonismo de la Margen Izquierda del Río Navarro". 1997.

Committee on Gas and Liquid Fuel Lifelines (ASCE): "Guidelines for the Seismic Design of Oil and Gas Pipeline Systems". 1984.

Geomatrix: "Acueducto Orosi. Sub-Estudio de la Vulnerabilidad Sísmica del Acueducto Orosi". 1994.

Silva Montell, Enrique: "Proyecto Orosi. Estudio de la Vulnerabilidad de la Conducción El Llano – Tres Ríos. Aspectos Hidráulicos, Hidrológicos y Estructurales". 1994.

7.0 CONCLUSIONES GENERALES

- 1.- Aunque las evidencias son pobres y no contundentes , existen elementos de juicio para asegurar que el ramal aparentemente más activo de la falla Navarro, en la zona de la estación 7+330, no representa un mayor peligro para el acueducto pues se ubica en la parte topográfica alta y plana. El otro ramal, aunque aparentemente menos activo, se ubica más cerca del sifón, por lo que merece especial cuidado en caso de activarse.
- 2.- Existe cierta posibilidad de que un evento telurico, de magnitud intermedia y profundidad somera, ocurra en el Valle del Guarco - Turrialba - Irazú en los próximos 15 a 63 años. Más difícil aún y con una probabilidad más baja, es estimar si la falla Navarro es la próxima en activarse o más bien, sería una de las tantas que se ubican en esa región.
- 3.- La ocurrencia de un evento sísmico en la falla Navarro sería el más crítico para la conducción pues el sifón se vería afectado por una sacudida sísmica de campo cercano, con efecto topográfico importante y posible directividad de la fuente.
- 4.- Para analizar el comportamiento del acueducto en la zona del sifón se recomienda utilizar los siguientes parámetros:

Aceleración horizontal pico	:	⁵⁰⁰ 50 cm/s ²
Aceleración horizontal para análisis	:	
Seudoestático	:	196 cm/s ²
Velocidad	:	30 cm/s X
Desplazamiento	:	7 cm
Duración movimiento fuerte	:	5 segundos
- 5.- Dado que el tramo analizado de la conducción se encuentra cimentado sobre material considerado como roca, no es de esperar amplificaciones de los valores estimados. Es importante resaltar que los suelos rígidos o roca se caracterizan por tener movimientos sísmicos predominantemente con características de período corto.
- 6.- Para la falla Navarro, que es una falla combinada del tipo desplazamiento de rumbo con componente normal se ha estimado, para efectos de análisis de la conducción, un desplazamiento máximo horizontal de 30 cm y desplazamientos verticales y horizontales de 14 cm. Es importante mencionar que solamente se han observado desplazamientos antiguos en la traza norte de la falla Navarro, lo cual cruza la conducción a unos 200 m del sifón.

- 7.- Se ha elaborado un espectro elástico que representa la envolvente del movimiento del terreno generado por sismos ocurridos a distancias hipocentrales de 8,1 km, 10 km, 12,2 km y 15,6 km que representan, respectivamente, distancias y profundidades de 4 km y 7 km, 7 km y 7 km, 7 km y 10 km, 12 km y 10 km. Las magnitudes de los sismos son $M_s=6,3$; $M_s=6,75$; $M_s=7,5$ ocurriendo respectivamente a las distancias más cortas, intermedias y más lejanas.
- 8.- Desde el punto de vista hidráulico no hay una forma efectiva de disminuir los efectos de la ruptura de la tubería en el sifón sobre el río Aguacaliente. La falla generaría un fenómeno transitorio muy complicado que podría dañar la tubería en varios sitios donde la succión sería considerable y el riesgo de cavitación es alto. Al anterior se une la imposibilidad de determinar la localización y la forma de la ruptura, así como la dirección del chorro saliente que podría desestabilizar buena parte del talud.
- 9.- La inclusión de válvulas de guarda, específicamente aguas arriba y aguas abajo del sifón no tiene mucho sentido práctico pues la válvula de aguas arriba debería cerrarse muy lentamente para limitar la magnitud del golpe de ariete a valores no mayores de 100 metros de carga de agua, aceptables para seguridad de la conducción. La válvula de aguas abajo no provocaría sobre presiones importantes, pero produciría rompimiento de la columna de agua a ambos lados de la misma. Si se aumentara el tiempo de cierre de las válvulas pero se pierde el objetivo ya que el caudal vertido en el sitio de falla habrá sido suficiente para causar cuantiosos daños.
- 10.- No se ha determinado que haya probabilidad de formación de cuñas o planos que puedan inducir un deslizamiento por falla planar, cuña o por volcamiento. Dado que la topografía del sitio es abrupta, con taludes cuyas pendientes y direcciones de pendientes son variadas, no se descarte la formación de planos que posibiliten el deslizamiento de algún bloque. Sin embargo, estos planos se formarían en taludes pequeños donde la masa susceptible a deslizarse es menor y además, no tendría efecto sobre la conducción.
- 11.- Los taludes longitudinales y transversales más pronunciados son estables, pues sus factores de seguridad son superiores a 2.
- 12.- No se encontró evidencia de que la zona es susceptible a licuación.
- 13.- Las deformaciones calculadas para el desplazamiento máximo de la falla Navarro (30cm) son absorbidas eficazmente por la conducción sin daño esperado pues, aún en una condición límite de deformación, los factores de seguridad son superiores a 1,9 que se consideran aceptables dada la condición excepcional del evento.

8.0 RECOMENDACIONES

- 1.- Para permitir que la tubería se deforme elásticamente entre los dos bloques de anclaje que se localizan en las estaciones 6+767 y 7+414, conviene deslizar la tubería de las pantallas de hormigón que se han construido para el control de aguas superficiales. En el caso de que estas pantallas se remuevan, el control de aguas superficiales se hará con elementos cortaflujo que no impidan el eventual desplazamiento del conducto. Se puede aprovechar esta labor de remoción para dejar la tubería libre dentro de un espacio relleno de arena o grava fina para permitirle un desplazamiento sin restricciones.
- 2.- Conviene analizar la posibilidad de proveer a la tubería de un sistema de protección catódica que disminuya la corrosión, a fin de que el espesor de la tubería no disminuya. Dentro de las posibilidades de inspección se debe estar atento a la aparición de puntos de corrosión, para su reparación y eliminación de sus fuentes.