MINTRANSPORTE

TODOS POR UN NUEVO PAÍS
PAZ EQUIDAD EDUCACIÓN

NIT.899.999.055-4

ENTIDAD ISO 9001:2008 NTC GP 1000:2009 CERTIFICADA
SO-2014006883 A
SO-2014006883 H

RESOLUCIÓN NÚMERO 0004401 DE 2017

(17 OCT 2017

"Por la cual se adopta la Guía de diseño de pavimentos con placa huella"

EL MINISTRO DE TRANSPORTE

En ejercicio de las facultades Constitucionales y legales, especialmente las que le confiere el parágrafo 3 del artículo 13 de la Ley 105 de 1993 y,

CONSIDERANDO

Que de conformidad con el artículo 2 del Decreto 2618 de 2013, corresponde al Instituto Nacional de Vías, entre otras funciones, elaborar conjuntamente con el Ministerio de Transporte los planes, programas y proyectos tendientes a la construcción, reconstrucción, mejoramiento, rehabilitación, conservación, atención de emergencias, y demás obras que requiera la infraestructura de su competencia, así como, definir la regulación técnica relacionada con la infraestructura de los modos de transporte carretero, fluvial, férreo y marítimo.

Que existe la necesidad de adelantar y continuar programas de pavimentación de vías de bajo tránsito, que sirven de acceso a las vías principales para comunicar a las comunidades localizadas en zona de influencia, con las carreteras de segundo y primer orden y acceder de esta manera a los centros de consumo.

Que el Instituto Nacional de Vías- INVIAS suscribió el contrato No. 1239 de 2015, con el Consorcio Manuales y Guías Ceal, para la elaboración de la Guía de Diseño de Pavimentos con Placa Huella.

Que la Guía de diseño de pavimentos con placa huella elaborada por el Consorcio Manuales y Guías Ceal, fue socializado el día 13 de abril de 2016, con los Gremios de la Ingeniería, la Academia, las firmas consultoras, así como con las Entidades Estatales.

Que se hace necesario, adoptar la Guía de diseño de pavimentos con placa huella, para la construcción de vías terciarias como alternativa de pavimentación en los contratos que adelanta el Instituto Nacional de Vías – INVIAS.

Que el Instituto Nacional de Vías- INVIAS, conservará los documentos asociados al proceso de divulgación y participación ciudadana, incluidos los cronogramas, actas, comentarios, grabaciones e informes que evidencien la publicidad del proyecto y la participación de los ciudadanos y grupos de interés, todo ello en concordancia con las políticas de gestión documental y de archivo de la entidad.

Que mediante memorando 20175000015793 de 2017, el Director de Infraestructura de la época del Ministerio de Transporte, solicita la emisión del acto administrativo respectivo.

Que el contenido de la presente resolución, fue publicado en la página web del Ministerio de Transporte, en cumplimiento de lo determinado en el literal 8 del artículo 8 de la Ley 1437 de 2011, desde el 24 al 30 de marzo de 2017, con el objeto de recibir opiniones,

sugerencias o propuestas alternativas.

En mérito de lo expuesto,

RESUELVE

Artículo 1: Adoptar la Guía de Diseño de Pavimentos con Placa-huella, para el diseño y construcción de vías terciarias a cargo del Instituto Nacional de Vías "INVIAS", la cual hace parte integral de la presente resolución, junto con los anexos 1, 2 y 3.

Artículo 2: El Instituto Nacional de Vías –INVIAS deberá tener en sus archivos todos los documentos (antecedentes) que sirvieron de sustento para la expedición de presente acto administrativo y tenerlos a disposición de las autoridades que los requieran.

Artículo 3: La presente Resolución rige a partir del día siguiente de su publicación en el Diario Oficial.

PUBLÍQUESE Y CÚMPLASE

Dada en Bogotá D. C., a 17 OCT 2017

GERMÁN CARDONA GUTIÉRREZ
Ministro de Transporte

Aprobó: Cesar Augusto Peñaloza Pabón· Viceministra de Infraestructura
Carlos Alberta García Mantes, Directar General "INVIAS"
Huga Herrera · Director Técnica "INVIAS" (e)
Jefe Oficina Asesara Jurídica "INVIAS"
Carlas Alberto Valencia Escabar, Subdirectar de Estudias e Innavación "INVIAS"
Alfonso Manteja Fanseca "INVIAS"
Mario Peláez – Directar de Infraestructura Ministerio de Transporte
Revisó: Andrés Mancipe González – Jefe Oficina Asesora Jurídica – Ministeria de Transporte
Claudia Mantaya C – Grupa Canceptas y Apoyo Legal Ministeria de Transporte

0004401 17 OCT 2017

REPÚBLICA DE COLOMBIA

MINISTERIO DE TRANSPORTE

INSTITUTO NACIONAL DE VÍAS

SUBDIRECCIÓN DE ESTUDIOS E INNOVACIÓN

Fotografía: Alcaldía de Sibaté

Guía de Diseño de Pavimentos con Placa-huella

MINTRANSPORTE

INVIAS

TODOS POR UN NUEVO PAÍS

PAZ EQUIDAD EDUCACIÓN

0004401 17 OCT 2017

REPÚBLICA DE COLOMBIA

PRESIDENTE DE LA REPÚBLICA
Juan Manuel Santos Calderón

MINISTRA DE TRANSPORTE
Natalia Abello Vives

DIRECTOR GENERAL INSTITUTO NACIONAL DE VIAS - INVIAS
Carlos Alberto García Montes

DIRECTOR TÉCNICO – INVIAS
Luis Roberto D'Pablo Ramírez

SUBDIRECTOR DE ESTUDIOS E INNOVACIÓN
Carlos Alberto Valencia Escobar

GESTOR TÉCNICO DE CONTRATO
Alfonso Montejo Fonseca

CONSULTOR
Consorcio Manuales y Guías Ceal 2015

MINTRANSPORTE

INVIAS
INSTITUTO NACIONAL DE VIAS

TODOS POR UN NUEVO PAÍS
PAZ EQUIDAD EDUCACIÓN

0004401 17 OCT 2017

REPÚBLICA DE COLOMBIA

EMPRESAS DEL CONSORCIO

El Alcázar SAS
Compañía de Consultoría y Construcciones LTDA
Vías Alfa EU

GRUPO DE TRABAJO DEL CONSULTOR

Alfonso Murgueitio Valencia	Coodirector de Estudio
Juan Carlos Orobio Quiñones	Coodirector de Estudio
Armando Orobio Quiñones	Especialista en Pavimentos
José Fernando Sánchez Ordóñez	Especialista en Vías
Carlos Ignacio Paz Achipiz	Especialista en Drenaje Vial
Juan Manuel Mosquera Rivera	Especialista en Estructuras
Carlos Alberto Hernández Galindo	Especialista en Estructuras
Jairo Hernán Gómez Realpe	Diseño Gráfico

6

0004401 17 OCT 2017

TABLA DE CONTENIDO

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN DEL PAVIMENTO CON PLACA-HUELLA **02**

1.1 Criterios básicos de diseño del pavimento con placa-huella 02

1.2 Periodo de diseño 10

1.3 Vehículo de diseño 10

1.4 Elementos que integran el pavimento con Placa-huella y sus funciones 11

1.4.1 Subrasante 11

1.4.2 Subbase 12

1.4.3 Placa-huella y riostra 12

1.4.3.1 Placa-huella 13

1.4.3.2 Riostra 13

1.4.4 Piedra pegada 14

1.4.5 Berma-cuneta y bordillo 14

1.4.6 Otros elementos de drenaje superficial y subdrenaje 15

1.5 La sección transversal recomendada por la Guía 15

1.6 Sección transversal en tangente 15

1.7 Sección transversal en curvas horizontales 15

1.7.1 Peralte 15

1.7.2 Sobreancho 15

1.7.3 Curvas tipo en función de la deflexión y el radio de la curva 16

1.8 Sección transversal en Zonas de Cruce 31

CAPÍTULO 2

DISEÑO ESTRUCTURAL **34**

2.1 Enfoque conceptual del diseño estructural 34

0004401 17OCT2017

2.1.1 Antecedentes 34

2.1.2 Criterio de diseño adoptado 35

2.1.2.1 Incidencia de la intensidad y composición del tránsito 36

2.1.2.2 Incidencia del clima 36

2.1.2.3 Incidencia de la capacidad de soporte de la subrasante 36

2.2 Características de la mezcla de concreto 37

2.3 Resistencia del acero de refuerzo 37

2.4 Placa-huella en concreto reforzado 38

2.4.1 Dimensiones y refuerzo 38

2.4.2 Esquema en planta, perfil y detalles 39

2.5 Riostra 40

2.5.1 Dimensiones y refuerzo 40

2.5.2 Esquema en planta, perfil y detalles 41

2.6 Juntas 43

2.6.1 Junta transversal de construcción 43

2.6.1.1 Junta Transversal de Construcción de la Placa-huella 43

2.6.1.2 Junta Transversal de Construcción de la Berma - cuneta 44

2.6.1.3 Junta Transversal de Construcción de la Riostra 44

2.6.2 Junta longitudinal de construcción 45

2.6.2.1 Junta entre Placa-huella, Riostra o Berma Cuneta y la Piedra Pegada 45

2.7 Piedra pegada 45

2.7.1 Características de los materiales 45

2.7.2 Colocación de la piedra pegada 45

2.8 Diseño estructural de la Berma-cuneta y el Bordillo 46

2.8.1 Esquema en planta, perfil y detalles 46

0004401 17 OCT 2017

CAPÍTULO 3

RECOMENDACIONES PARAEL DISEÑO GEOMÉTRICO DE LA VÍA 48

3.1 Metodología sugerida para la elaboración del diseño geométrico de la vía 48

3.2 Planos anexos a la Guía. Ejemplos

Plano No. 1 Levantamiento topográfico de la vía existente

Plano No. 2 Eje en planta de la vía

Plano No. 3 Planta- Perfil

Plano No. 4 Vista en planta de la sección transversal con la diagramación de los elementos que la integran

CAÍTULO 4

RECOMENDACIONES PARA LA CALIFICACIÓN DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE DE LA SUBRASANTE DE LA VÍA 58

4.1 Identificación de las Unidades Homogéneas de Diseño 58

4.2 Posición del nivel freático 59

4.3 Clasificación de los suelos de subrasante 59

4.4 Calificación del potencial de expansión del suelo de la subrasante de cada una de las Unidades de Diseño 67

4.5 Determinación del CBR representativo de la subrasante de cada Unidad Homogénea de Diseño 67

4.6 Subrasante constituida por suelos expansivos 70

CAPÍTULO 5

RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DEL DRENAJE SUPERFICIAL DE LA VÍA 73

5.1 Objetivo del drenaje de la vía 73

5.2 Determinación de la Intensidad de la lluvia (mm/h) en la zona del proyecto 73

0004401 17 OCT 2017

5.2.1 Identificación de la Estación Meteorológica representativa. Serie histórica de la precipitación 73

5.2.2 Cálculo de la Intensidad de la lluvia (mm/h) 74

5.2.3 Ejemplo de aplicación para obtener las curvas I-D-F 76

5.3 Control hidráulico de la Berma – cuneta 78

5.3.1 Berma - cuneta recomendada en la presente Guía 78

5.3.2 Parámetros adoptados para la Berma – cuneta recomendada 78

5.3.3 Determinación del caudal de demanda dado un espaciamiento entre alcantarillas 80

5.3.4 Determinación del caudal que puede transportar la Berma – cuneta tipo 80

5.3.5 Criterios de diseño 81

5.3.6 Familia de curvas I-P-L 81

5.3.7 Ejemplo de aplicación 83

5.4 Ubicación de las alcantarillas 84

5.4.1 Identificación de la abscisas donde se inicia y finaliza las cunetas 84

5.4.2 Selección de sitios de cruce de flujos de agua permanentes 84

5.4.3 Localización de las alcantarillas 85

5.5 Alcantarilla tipo 86

5.6 Aliviadero tipo y su ubicación 88

ANEXO 1 El valor del sobreancho en las curvas y su transición

ANEXO 2 Análisis de pavimentos en Placa-huella de concreto simple

ANEXO 3 Memoria de cálculo estructural de pavimentos con Placa-huella en concreto reforzado

0004401 17 OCT 2017

LISTA DE FIGURAS

1.1	Vehículo de diseño. Camión C-3	11
1.2	Vista en planta y sección en un tramo recto	11
1.3	Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 1 $\Delta \leq 150°$ y $Rc > 150m$	18
1.4	Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 2 $\Delta \leq 150°$ y $80m < Rc \leq 150$	19
1.5	Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 3 $\Delta \leq 150°$ y $60\ m < Rc \leq 80m$	20
1.6	Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 4 $\Delta \leq 150°$ y $40m < Rc \leq 60m$	21
1.7	Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 5 $\Delta \leq 150°$ y $30m < Rc \leq 40m$	22
1.8	Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 6 $\Delta \leq 150°$ y $25m < Rc \leq 30m$	23
1.9	Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 7 $\Delta \leq 45°$ y $20m < Rc \leq 25m$	24
1.10	Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 8 $45 < \Delta \leq 150°$ y $20m < Rc \leq 25m$	25
1.11	Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 9 $\Delta \leq 30°$ y $11m \leq Rc \leq 20m$	26
1.12	Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 10 $30 < \Delta \leq 45°$ y $11m \leq Rc \leq 20m$	27
1.13	Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 11 $45 < \Delta \leq 90°$ y $11m \leq Rc \leq 20m$	28
1.14	Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 12 $90 < \Delta \leq 150°$ y $11m \leq Rc \leq 20m$	29
1.15	Vista en planta de la modulación de placas-huella y riostras en la curva TIPO 10	30
1.16	ALTERNATIVA UNO. Zona de Cruce	31
1.17	ALTERNATIVA DOS. Zona de Cruce	32
2.1	Planta de Distribución del Refuerzo	39
2.2	Corte Transversal	40
2.3	Corte Longitudinal	40
2.4	Planta	41
2.5	Corte Longitudinal	42
2.6	Corte Transversal Sección en Placa-huella	42
2.7	Corte Transversal Sección en Piedra Pegada	43
2.8	Junta transversal de construcción en la Placa-huella	43
2.9	Junta Transversal de Construcción en la Berma-cuneta	44

0004401 17 OCT 2017

2.10	Junta transversal de construcción en la Riostra	44
2.11	Junta longitudinal entre Placa-huella o Berma-cuneta y la Piedra pegada	45
2.12	Planta	46
2.13	Corte Berma-cuneta Sección en la Cuneta	46
4.1	Carta de Plasticidad de Casagrande	62
4.2	Correlación AASHTO. Clasificación del suelo vs CBR	71
5.1	Regiones en Colombia para definición de parámetros a, b, c y d	75
5.2	Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (Periodo retorno T)	77
5.3	Berma-cuneta (recomendada en la presente Guía)	78
5.4	Lámina de agua en la Berma-cuneta (recomendada en la presente Guía)	78
5.5	Ancho de impluvium	79
5.6	Curvas I-P-L para pendientes de vía de 0.5% a 7%	82
5.7	Curvas I-P-L para pendientes de vía de 8.0% a 12%	83
5.8	Ejemplo de localización de alcantarillas	85
5.9	Ejemplo de localización de alcantarillas	86
5.10	Planta y perfil de la alcantarilla típica	87
5.11	Aliviadero típico en planta	88
5.12	Aliviadero típico en perfil	89
5.13	Localización de los aliviaderos	89

0004401 17 OCT 2017

LISTA DE TABLAS

1.1	Curvas tipo en función de la deflexión y el radio de la curva	16
3.1	Ejemplo de Cartera de Coordenadas de la Línea de Base	52
3.2	Ejemplo de Cartera de Localización del Eje	52
3.3	Ejemplo de Cartera de Rasante	54
4.1	Sistema de Clasificación Unificada (USCS)	61
4.2	Correlación Límites de consistencia vs. Potencial de expansión	67
4.3	Correlación PVC vs Expansión	67
5.1	Periodos de retorno para el diseño de obras de drenaje vial	74
5.2	Parámetros según regiones del país	75
5.3	Datos de precipitación de una estación meteorológica	76
5.4	Valores de la Intensidad (i) en mm/hora calculadas para generar las curva I-D-F	77
5.5	Valores calculados para el dibujo de las curvas I-P-L	82

13

Q004401 17OCT2017

CAPÍTULO 1

DESCRIPCIÓN DEL PAVIMENTO CON PLACA-HUELLA

0004401 17 OCT 2017

CAPÍTULO 1
DESCRIPCIÓN DEL PAVIMENTO CON PLACA-HUELLA

1.1 Criterios básicos de diseño del pavimento con Placa-huella

El pavimento con Placa-huella constituye una solución para vías terciarias de carácter veredal que presentan un volumen de tránsito bajo con muy pocos buses y camiones al día siendo los automóviles, los camperos y las motocicletas el mayor componente del flujo vehicular.

Los principales atributos de éste tipo de pavimento son:

- Ofrecer permanentemente condiciones de circulación satisfactorias durante un amplio período de servicio.
- No requerir acciones de mantenimiento diferentes a la limpieza de las obras de drenaje y la rocería de las zonas laterales.
- No requerir mayores modificaciones a la geometría de la vía existente ya que por condiciones de rugosidad de la superficie de éste tipo de pavimento la velocidad de los vehículos tiende a ser muy baja. Es pertinente manifestar que la baja velocidad es un control implícito de la accidentalidad.
- Reducir los costos de construcción y mantenimiento respecto a los mismos costos de un pavimento convencional.
- Ofrecer la posibilidad de utilización de materiales y mano de obra locales.

Para la adecuada comprensión de la presente Guía de diseño es conveniente que el usuario conozca previamente algunos aspectos, los cuales se desarrollan en detalle en los capítulos que integran el documento.

a) El mecanismo de falla del pavimento con Placa-huella.

El mecanismo de respuesta a los esfuerzos producidos por el eje de un vehículo que se desplaza sobre la superficie de un pavimento con placas-huella es radicalmente diferente al mecanismo de respuesta de un pavimento flexible o de un pavimento rígido constituido por losas de dimensiones grandes.

En un pavimento flexible aproximadamente el 70% de la deflexión total la aporta la subrasante, por lo cual la durabilidad del pavimento es altamente sensible a la rigidez de la subrasante, por esta razón que es indispensable realizar una cuidadosa evaluación de dicha variable para este tipo de pavimento. En los pavimentos rígidos la influencia de la rigidez del apoyo de las losas presenta

0004401 17 OCT 2017

una incidencia menor, hasta el punto que si no fuera por la necesidad de controlar el bombeo y proporcionar un apoyo homogéneo a las losas éstas se podrían construir directamente sobre la subrasante. En los pavimentos con placa-huella por ser rígidos y además reforzados la influencia de la rigidez del apoyo es despreciable después de cumplir con unos requisitos mínimos.

En los pavimentos flexibles y en los rígidos convencionales la falla estructural (o ruptura) se presenta por acumulación de pequeños consumos de fatiga en los materiales que constituyen la estructura. Tales consumos de fatiga son producidos por el paso de los ejes de los vehículos durante la vida de servicio de dicho pavimento. Ésta es la razón por la que es necesario establecer, mediante un estudio de tránsito, el espectro de cargas que circularían por el pavimento durante el período de diseño.

En los pavimentos con placa-huella, que son estructuras de concreto reforzado similares a la estructura de un edificio, la falla estructural (o ruptura) se produce por la aplicación de una carga que produzca esfuerzos que superen la resistencia última de los elementos de concreto reforzado. Tal es el caso de un edificio en el que por exceso de cargas o por asentamientos diferenciales entre columnas se producen esfuerzos en un elemento estructural que superan su resistencia última y lo llevan al colapso.

Durante la elaboración de la presente Guía se analizó la posibilidad de utilizar placas-huella de concreto simple, es decir, sin refuerzo excepto los pasadores para la transmisión de cargas. Los modelos mediante elementos finitos enfocados al diseño por consumo acumulado de fatiga producido por un espectro de cargas, tipo método PCA, permitieron concluir que, para las cargas estudiadas, no es viable la utilización de placas-huella de solo concreto simple (sin refuerzo) ya que debido a las pequeñas dimensiones de dichas placas el control de la falla por erosión es extremadamente incierto.

Lo anterior condujo a que el diseño del pavimento con placa-huella se tuviese que hacer como una estructura de concreto reforzado totalmente apoyada sobre el suelo (en este caso el suelo es la subbase granular) constituida por placas-huella y riostras que trabajan monolíticamente y cuyo mecanismo de falla es por carga última.

La conclusión es que si el eje de un vehículo que circule sobre el pavimento con placas-huella tiene un peso y configuración tales que se produzcan en las placas-huella esfuerzos que superen su resistencia última, una ÚNICA pasada de ese vehículo produciría la falla estructural, es decir la ruptura de todas las placas-huella.

b) Efecto del clima

Los parámetros del clima de la zona del proyecto que inciden en el comportamiento de un pavimento son fundamentalmente la temperatura y la precipitación. La temperatura en un pavimento de concreto, como lo es el de placa-huella, se refleja en los esfuerzos de alabeo. Por las dimensiones de las placas y la presencia de la armadura de acero los esfuerzos de alabeo no requieren atención especial tal como se evidenció en la modelación mediante elementos finitos. La precipitación se controla con la correcta provisión de las obras de drenaje como

0004401 17 OCT 2017

berma-cunetas, alcantarillas, aliviaderos y subdrenes.

c) El tránsito

De lo ya expuesto respecto al mecanismo de falla del pavimento con placa-huella, que es por carga última, se puede concluir que la elaboración de un estudio de tránsito traducido en un espectro de cargas resulta innecesario. El estudio del espectro de cargas es pertinente en el diseño de un pavimento que falle estructuralmente por acumulación de fatiga no siendo éste el caso del pavimento con placa-huella.

Lo relevante es la selección del Vehículo de Diseño puesto que de él depende el peso y configuración del eje de referencia y la adecuación geométrica que se le debe construir a la vía para que dicho vehículo pueda circular adecuadamente.

Para el tipo de vías en las que se construirían pavimentos con placa-huella y dado el alto costo por kilómetro que demanda este tipo de solución lo mínimo razonable sería adoptar como vehículo de diseño el camión C-2 con un eje trasero sencillo de once (11) toneladas.

La adecuación geométrica requerida por la vía para que pueda circular un camión C-2 consiste básicamente en el sobreancho en las curvas de deflexión grande y radio pequeño. Tal adecuación sería la misma que la requerida por un camión C-3 puesto que su longitud respecto al camión C-2 difiere en tan solo cuarenta centímetros aproximadamente. Si por la vía ya adecuada geométricamente y con el pavimento con placa-huella puede circular un camión C-2 también lo podría hacer un camión C-3.

Como no es posible garantizar que en un periodo de servicio de veinte (20) o más nunca circulará un camión C-3 y teniendo presente que en los pavimentos con placa-huella la falla se produce por carga última, el vehículo de diseño no puede ser inferior al camión C-3 ya que el paso de tan solo un vehículo de éste tipo podría destruir las placas-huella.

Por lo anterior, el eje de referencia para el diseño estructural del pavimento constituido por una sucesión de placas y riostras reforzadas utilizando la metodología de diseño por carga última debe ser el eje tándem de 22 toneladas de un camión C-3. El diseño debe ser tal que al desplazarse dicho eje sobre la superficie no se produzca en las placas-huella un nivel de esfuerzos que les genere la falla, es decir, su fractura.

Si el paso de un eje tándem de 22 toneladas no produce la falla significa que la estructura estaría habilitada para resistir un número infinito de pasadas de dicho eje. En consecuencia, el paso de ejes de menor agresividad, independientemente de su cantidad, con mayor razón no la llevarían a la falla. So pena de incurrir en una grave ligereza se debe diseñar el pavimento con placa-huella para que no sea fracturado por el paso de un único camión C-3 puesto que existe la probabilidad de que en algún momento de la vida de servicio un camión de éste tipo circule por la vía.

Ahora bien, si el vehículo de diseño adoptado en la Guía hubiese sido el camión C-2, que como ya se dijo sería el mínimo vehículo de diseño a adoptar, las características del pavimento también

0004401 17 OCT 2017

hubiesen sido prácticamente las mismas. Tales razones son:

- Como se manifiesta más adelante el espesor de la subbase granular es igual para cualquier diseño habiéndose establecido en quince centímetros (0.15 m). El espesor de las placas-huella también es de quince centímetros (0.15 m) y es igual para cualquier diseño. El espesor único adoptado para la subbase granular y para las placas-huella obedece fundamentalmente a conveniencias constructivas más que a requerimientos para controlar los esfuerzos producidos por los vehículos.

- La cuantía de acero necesaria para controlar los esfuerzos producidos por el paso de un camión C-2 resulta un poco menor que la necesaria para controlar los esfuerzos producidos por el paso de un camión C-3. Tal disminución se traduce en un ligero aumento en la separación de las varillas longitudinales que conforman la armadura de la placa-huella. Sin embargo, se consideró que dicho ahorro (marginal comparado con la inversión total en la vía) no compensa el riesgo de que en algún momento de la vida de servicio del pavimento, veinte años como mínimo, pase un camión C-3 y esa única pasada produzca esfuerzos superiores a los permitidos según el método de diseño por carga última produciendo la fractura de las placas-huella.

d) La subrasante y la subbase granular

Del análisis de sensibilidad de algunas variables que pudiesen incidir en el comportamiento del pavimento con placa-huella se pudo concluir que la cuantía de acero y la longitud, ancho y espesor tanto de la placa-huella como de la riostra no son sensibles a la rigidez de la superficie de apoyo, en éste caso del conjunto subrasante- subbase granular. Por esta razón se adoptó para la subbase granular un espesor único de quince (15) centímetros y la calidad exigida en las Especificaciones Generales de Construcción del Instituto Nacional de Vías - INVIAS. Dicho espesor obedece a razones constructivas como son el contribuir a lograr la lisura de la superficie de apoyo de las placas, que es la subbase granular, a poder lograr la compactación requerida cuando los suelos de apoyo sean de precaria calidad y a disponer de una superficie de trabajo limpia.

El espesor adoptado es suficiente para subbases granulares colocadas sobre suelos con CBR mayor o igual a tres por ciento (3%). Suelos con valores de CBR menores a 3% son suelos de comportamiento complejo que requieren del concurso de un especialista para establecer los procedimientos de mejoramiento. La evaluación de la subrasante se reduce a detectar sectores con subrasantes de comportamiento complejo como pueden ser los suelos expansivos, los suelos demasiado blandos, etc.

e) Espesor de la Placa-huella

Como resultado de la modelación mediante elementos finitos del paso del eje tándem del camión C-3 (22 toneladas distribuidas en dos ejes simples de 11 toneladas cada uno separados 1,20 m centro a centro) se encontró que el espesor de la placa-huella no es sensible a la rigidez del apoyo, en este caso del conjunto subrasante-subbase granular. El espesor requerido de concreto para soportar los esfuerzos producidos por el eje de diseño es menor de quince (15) centímetros, pero por facilidad constructiva y adecuado recubrimiento de la armadura de acero se adoptó un espesor único de quince (15) centímetros.

f) Criterios para el diseño de la sección transversal en tangente

Tal como se dijo al inicio de este numeral la Guía de Diseño de Pavimentos con placa-huella está concebida para que éste tipo de solución ofrezca a sus usuarios seguridad y confort y además funcione en condiciones satisfactorias al menos durante sus primeros veinte (20) años de servicio, requiriendo únicamente del mantenimiento rutinario como lo es la limpieza de las obras de drenaje y la rocería de las zonas laterales.

Para garantizar la seguridad y confort de los usuarios se deben rectificar las características geométricas de la vía existente tanto en planta como en perfil y sección transversal.

Para garantizar la durabilidad del pavimento la Guía recomienda una sección transversal en tangente de cinco (5) metros de ancho.

El motivo principal de la adopción de éste ancho obedece a evitar, hasta donde sea posible, que los camiones y buses circulen sobre la piedra pegada dado que este es un material cuyo comportamiento ante la solicitación de las cargas de los vehículos es totalmente incierto dada la dificultad de establecer un modelo que permita predecir en el largo plazo dicho comportamiento. Por lo anterior y teniendo en cuenta que el período de servicio del pavimento no puede ser inferior a veinte (20) años la única opción responsable es evitar que los camiones y buses circulen por las franjas de piedra pegada.

Como se puede observar en la Figura 1.2 las placas-huella son de 90 centímetros de ancho separadas por una franja central también de 90 centímetros en piedra pegada. Cuando un camión o un bus recorre la vía sin visualizar un vehículo que viaje en sentido contrario lo hace sobre las placas-huella que son los elementos diseñados para soportar las cargas.

Cuando surge la necesidad de cruzarse con otro vehículo que se desplaza en sentido contrario se presentan tres situaciones diferentes dependiendo del tipo de vehículo con el que se deba cruzar:

1. Si el vehículo que viaja en sentido contrario es una motocicleta ésta cruza sobre la franja exterior de piedra pegada con ancho de 45 centímetros o la berma-cuneta sin que el camión deba salir de las placa-huellas.

2. Si el vehículo que viaja en sentido contrario es liviano (automóvil, campero o camioneta) el ancho de la sección sí permite el cruce en el sitio de encuentro. Para ello el camión o el bus tendría que salirse de la placa-huella para acercarse al bordillo de la berma-cuneta. Esta maniobra implica que sus ruedas derechas crucen la franja exterior de piedra pegada y se estacionen sobre la berma-cuneta, siendo ésta la razón de colocar acero de refuerzo a la berma-cuneta. Las ruedas izquierdas del camión se estacionarían sobre la franja central de piedra pegada.

   El cruce de un camión o un bus con un vehículo liviano en el punto de encuentro es indeseable no obstante que el daño que se pudiese causar a la piedra pegada en dicho punto podría ser relativamente bajo ya que la probabilidad de que dos vehículos se crucen sistemáticamente en el mismo sitio sería muy baja.

0004401 17 OCT 2017

Lo deseable sería que el camión o el vehículo liviano se estacione en la Zona de Cruce especialmente provista y diseñada para ello. Así no se afectarían las franjas de piedra pegada. Lo anterior implicaría promover acciones para generar conciencia en los usuarios de la vía, y en general en las comunidades aledañas, de la necesidad de proteger el elemento más vulnerable del pavimento realizando la maniobra de cruce en los sitios dispuestos para ello.

3. Si el vehículo que viaja en sentido contrario es también un camión ó un bus el ancho de la vía es insuficiente y la maniobra debe ser realizada necesariamente en las Zonas de Cruce. Uno de los vehículos deberá esperar en ésta zona a que el otro cruce.

En conclusión, una sección transversal con ancho superior a cinco (5) metros no es recomendable por dos razones:

- Permitiría que todos los vehículos, incluyendo camiones y buses, se pudiesen cruzar en cualquier punto de la vía además de poder circular permanentemente, con al menos una de las ruedas del eje cargado, sobre las franjas de piedra pegada exponiendo dichas franjas a un daño prematuro e impredecible.

- Anchos superiores a cinco (5) metros, además de causarle perjuicio al pavimento, conduciría a un mayor costo de la obra haciendo que no fuese alternativa económica competitiva frente a soluciones convencionales de pavimento flexible o rígido.

Igualmente, una sección transversal con ancho inferior a cinco (5) metros tampoco es recomendable porque se tendría que eliminar las franjas exteriores de piedra pegada obligando a una de dos situaciones, ambas indeseables:

- Que al cruzarse con el ciclista o motociclista el vehículo comercial se salga de la placa- huella y circule durante un trecho sobre la piedra pegada, o

- Que el ciclista o motociclista se desplace a la superficie inclinada de la berma-cuneta, que generalmente está cubierta de arenilla, con el consecuente riesgo de caída.

Además, un ancho menor a cinco (5) metros no permitiría el cruce de un vehículo comercial (camión ó bus) con un vehículo liviano obligando a que necesariamente uno de los dos vehículos se vea obligado a efectuar maniobras en reversa hasta encontrar una zona de cruce.

g) Criterios para el diseño de la sección transversal en las curvas

El criterio de diseño en los tramos en curva también es impedir que los camiones y buses realicen trayectorias sobre la piedra pegada.

Las vías donde es procedente construir pavimentos con placa-huella, en términos generales, presentan las siguientes características:

- Pendientes fuertes.
- Alto número de curvas horizontales por kilómetro.

20

0004401 17 OCT 2017

- Tangentes muy cortas.
- Radios de curvatura pequeños.
- Anchos de banca estrechos.

Las precarias condiciones geométricas sumadas a que el vehículo de diseño es el camión C-3 obligan a que un número importante de las curvas presentes en éste tipo de vías requieran sobreancho. Tal como se indica más adelante, a medida que aumenta la deflexión de la curva y disminuye su radio el sobreancho necesario es mayor.

Los camiones C-2 y C-3 al girar en la curva dibujan una trayectoria de sus ruedas traseras que abandona las placas-huella y recorre las franjas de piedra pegada. Dado que el objetivo es impedir que los camiones y buses circulen sobre la piedra pegada, que en este caso serían TODOS los camiones y TODOS los buses, es indispensable sustituir franjas de piedra pegada por franjas con placas-huella reforzadas.

En la Guía se propone armar la estructura del pavimento (placas-huella y riostras) ajustándola al diseño geométrico de la curva utilizando "fichas" en forma similar como se hace en los juegos de Extralandia o Lego.

Las fichas son placas-huella de forma rectangular o ligeramente trapezoidal de anchos preestablecidos: 0.45 m, 0.90 m, 1.35 m y 1.80m. y longitudes entre 1.00 m y 2.80 m. Los dos primeros valores de ancho de las placas-huella (0.45 y 0.90 m) corresponden al ancho de las franjas laterales de piedra pegada, al ancho de las placas- huella en tangente y al ancho de la franja central de piedra pegada. Los otros dos valores de ancho (1.35 y 1.80 m) son múltiplos de los dos valores anteriores y se requieren para el armado del pavimento en las curvas con sobreancho.

Es evidente que la cuantía de acero requerida por una placa-huella es mayor a medida que crece la longitud de ella. En este orden de ideas la placa-huella de 2.80 m de longitud (su ancho no influye) requiere más acero que la placa-huella de 1.60 m de longitud. Pero de las modelaciones con elementos finitos se concluyó que las diferencias en la cuantía de acero no son significativas por lo que se decidió asumir para todas las placas-huella la cuantía requerida por la más crítica que es la de 2.80 m de longitud. Lo anterior facilita enormemente los procesos constructivos ya que la armadura es la misma para todas las placas-huella. Lo mismo sucede para las riostras independientemente de su longitud.

Por lo anterior, la geometría del pavimento y específicamente la combinación de franjas de placas-huella y franjas de piedra pegada resulta convirtiéndose en la variable de diseño más relevante y explica por qué la Guía, para FACILITAR LA CONSTRUCCIÓN en los tramos en curva que es donde las trayectorias de los vehículos invaden sistemáticamente las franjas de piedra pegada, presenta las fichas que no son otra cosa que placas-huella de geometría preestablecida que combinadas adecuadamente permiten el armado del pavimento salvaguardando dichas franjas de piedra pegada.

0004401 17OCT2017

Sin embargo, el diseñador tiene libertad de modificar el ancho de la sección transversal de un proyecto en particular apartándose de la recomendación de la Guía siempre y cuando el diseño elegido permita garantizar la seguridad y confort de los usuarios y la durabilidad del pavimento con placas-huella. Además, la ampliación o reducción del ancho de la sección transversal debe respetar el ancho de las placas-huella y el ancho de la franja de piedra pegada entre dichas placas-huella que es de 0,90 m. La modificación del ancho de la sección transversal únicamente se puede realizar cambiando el ancho de las franjas exteriores de piedra pegada y el ancho de las berma-cunetas.

En el capítulo 5 de la Guía se ofrecen las pautas y procedimientos para el diseño y localización de las obras de drenaje superficial de la vía como son las berma-cunetas, las alcantarillas y los aliviaderos. Además, se recomienda un tipo de berma-cuneta que ofrece las ventajas descritas en dicho capítulo. Ahora bien, si las características del proyecto en particular exigen berma-cunetas de dimensiones distintas a las de la berma-cuneta recomendada el diseñador puede cambiarlas garantizando, como es obvio, el diseño hidráulico de las mismas. No sobra advertir que se debe mantener el concepto de berma-cuneta, así se modifiquen sus dimensiones, porque su bordillo trabaja como elemento de confinamiento de la calzada.

Además, si el ingeniero diseñador decide adoptar una sección transversal diferente a la recomendada por la Guía deberá establecer como parte fundamental del proyecto las medidas físicas y de control de tráfico que impidan, a lo largo del periodo de servicio del pavimento, que los vehículos puedan circular sobre las franjas de piedra pegada.

h) Resistencia del concreto

En la mayoría de las obras de pavimentación con placa-huella el concreto utilizado se fabrica en la vía, en donde no existen los medios para ejercer un control de calidad similar al ejercido en las plantas de concreto. Sin embargo, si se tiene en cuenta que la inversión en un pavimento con placa-huella es cuantiosa y que éste debe permanecer durante décadas en condiciones de servicio satisfactorias resulta obligatorio utilizar una mezcla de concreto que ofrezca garantía de durabilidad.

Por la razón anterior, que no es otra que garantizar la durabilidad del concreto sometido a la intemperie y al desgaste producido por la fricción al paso de las llantas de los vehículos, la Guía especifica que la fabricación de los elementos estructurales del pavimento se debe realizar con concreto de calidad aceptable que en éste caso se asimila a una resistencia a la compresión a los 28 días de $f'c = 210$ kg /cm^2.

Una vez identificada la fuente de agregados a utilizar en el proyecto es indispensable realizar, en laboratorio, el diseño de la mezcla de concreto incluyendo los ensayos de calidad a los agregados los cuales deben cumplir los requisitos para concreto estructural establecidos en las especificaciones vigentes del Instituto Nacional de Vías.

Ahora bien, si se realiza en la obra un control de calidad básico consistente en utilizar en la vía una mezcladora de un saco de cemento, verificar la limpieza de los agregados mediante inspección visual rechazando los que contengan limos, arcillas o materia orgánica, dosificar por volumen haciendo uso de cajones de madera correctamente dimensionados tanto para el agregado

22

0004401 17 OCT 2017

grueso como para el agregado fino y ejercer un permanente control del asentamiento de la mezcla no es difícil lograr una resistencia a los 28 días de f 'c = 210 kg /cm^2.

En las franjas de piedra pegada, cuyo material se asimila a un concreto ciclópeo, es necesario tener en cuenta que al igual que las placas-huella también van a estar sometidas al deterioro producido por el efecto del clima (sol y lluvia) y por el desgaste producido por la abrasión generada por las llantas de los vehículos así sea esporádica la circulación sobre ellas. Además, éstas franjas deben permanecer durante más de veinte años sin evidenciar deterioros significativos.

La especificación INV Art 630 - 2013 establece una resistencia del concreto menor para el ciclópeo. Lo anterior bajo el entendimiento que el concreto ciclópeo es para usos diferentes al de una eventual circulación de vehículos sobre este material. La Guía, en aras de velar por la durabilidad del pavimento con placa-huella, también determina que el concreto incorporado en las franjas de piedra pegada tenga una resistencia a los 28 días de f 'c = 210 kg /cm^2.

En cuanto a la piedra a utilizar se recomienda que sea de canto rodado ya que estas piedras presentan una mayor resistencia al desgaste.

Por último, es pertinente manifestar que los pavimentos con placa-huella son pavimentos atípicos, muy complejos en su funcionamiento en servicio y de los cuales no existen aún estudios científicos publicados que permitan evaluar su desempeño a largo plazo. En consecuencia, el buen juicio en el análisis de los parámetros de diseño, la racionalidad en la definición de las calidades de los materiales, los factores de seguridad en el proceso de diseño y la correcta selección de las vías donde pueda utilizarse este tipo de pavimento serán determinantes en el éxito de los proyectos medido en términos de su relación costo-beneficio.

La conclusión general es que en lo relacionado con los pavimentos con placa-huella es necesario cambiar de paradigma. Los conceptos tradicionales vinculados al diseño y construcción de los pavimentos flexibles y rígidos no aplican para los pavimentos con placa-huella. No es posible elaborar una Guía que presente diseños asociados a diferentes climas, diferentes espectros de tránsito, diferentes subrasantes y diferentes tipos de materiales tal como existen para el diseño de los pavimentos convencionales tanto flexibles como rígidos.

1.2 Período de diseño

El diseño del pavimento consignado en la presente Guía prevé que éste pueda prestar condiciones de servicio adecuadas por un período no menor a veinte (20) años siendo, como ya se dijo, la limpieza de las obras de drenaje y la rocería de las zonas laterales serían el único mantenimiento necesario.

1.3 Vehículo de diseño

Tomando en consideración que la vía una vez pavimentada debe permitir la circulación de los camiones que transporten los productos agropecuarios, forestales, mineros o industriales que se extraigan o fabriquen en la zona se ha adoptado como vehículo de diseño el camión C-3. En la Figura 1.1 se ilustran las dimensiones y pesos por eje de dicho camión.

0004401 17 OCT 2017

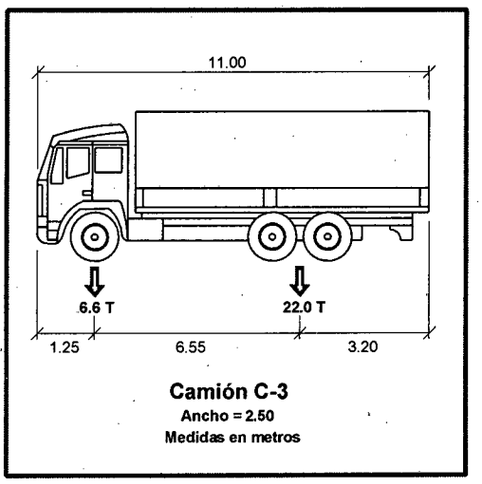


Figura 1.1 Vehículo de diseño. Camión C-3

1.4 Elementos que integran el pavimento con Placa-huella y sus funciones

El pavimento con Placa-huella lo integran los siguientes elementos tal como se ilustra en la Figura 1.2, los cuales hacen referencia a un tramo en tangente.

Tales elementos son:

1.4.1 Subrasante

Generalmente está constituida por el suelo natural con una capa de material de afirmado de espesor variable. La recomendación general es NO DESESTABILIZAR la superficie existente efectuando cajeos o excavaciones.

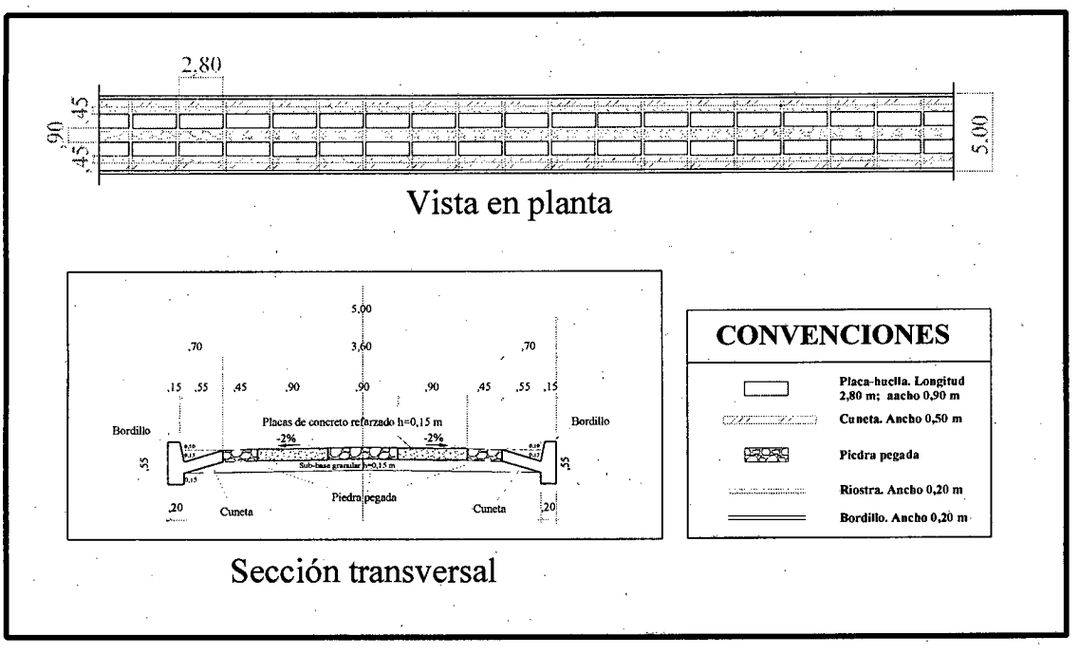


Figura 1.2 Vista en planta y sección en un tramo recto

0004401 17 OCT 2017

El criterio es obtener un perfil longitudinal aceptable realizando pequeñas correcciones tendientes a mejorar curvas verticales cóncavas demasiado pronunciadas. Para ello se harían rellenos en tramos de muy corta longitud con material seleccionado o con el material de afirmado utilizado para el mantenimiento de la vía o con el mismo material que sería utilizado para la sub-base.

La subrasante que se evalúa para calificar su capacidad de soporte es el estrato subyacente al afirmado existente. El aporte estructural de la capa de afirmado que pueda existir no se toma en cuenta y se considera como un factor de seguridad.

1.4.2 Subbase

Una vez que a la superficie existente se le haya rectificado su perfil longitudinal, con pequeños rellenos, y se encuentre adecuadamente compactada se deberá extender, conformar y compactar una capa de subbase que cumpla la especificación general vigente en el Instituto Nacional de Vías.

La subbase deberá tener, COMO MÍNIMO, quince (15) centímetros de espesor en todo el ancho de la sección transversal. Si la conformación de la superficie existente no permitió configurar el bombeo en las tangentes (-2%) y el peralte y su transición en las curvas (2%) ésta tarea se deberá efectuar al momento de construir la subbase. Lo anterior implica que la subbase tendría en la zona central de la calzada y en la parte externa de las curvas horizontales un espesor superior al mínimo de quince centímetros (0,15 m).

Las funciones de la subbase son:

- Constituir una superficie de trabajo limpia para construir sobre ella los elementos restantes que conforman el pavimento con Placa-huella.

- Incrementar la rigidez de la superficie de apoyo de las placas-huellas, de la piedra pegada y de las berma-cunetas.

- Controlar el eventual bombeo que se pudiese presentar por las juntas de construcción que se requieren.

1.4.3 Placa-huella y riostra

En la Figura 1.2 se puede observar un módulo de construcción que se repite. Este módulo está conformado por las placas-huella y la riostra. Se dice que es un módulo porque estructuralmente trabajan en conjunto.

Tanto las placas-huella como las riostras se construyen en concreto reforzado. Las placas-huella y la riostra de un módulo se funden monolíticamente con las placas-huella y la riostra del módulo siguiente y así sucesivamente conformando lo que se podría denominar un Pavimento de concreto de cemento Portland con refuerzo continuo, confinado mediante riostras uniformemente espaciadas.

0004401 17 OCT 2017

1.4.3.1 Placa-huella

La placa-huella es una losa de concreto reforzado fundida sobre la subbase en la que su acero de refuerzo se entrecruza con el acero de refuerzo de la riostra y con el acero de refuerzo de la placa-huella del módulo siguiente.

- La longitud máxima de la placa-huella es de dos metros con ochenta centímetros (2,80 m). Como el ancho de la riostra siempre es de veinte centímetros (0,20 m) la longitud máxima de un módulo es de tres metros (3,0 m) y corresponde a la longitud del módulo en tangente.

- En las curvas horizontales la longitud de la placa-huella puede fluctuar entre un (1,00) metro y dos metros con ochenta centímetros (2,80 m).

- El ancho de la placa-huella en tangente es de noventa centímetros (0,90 m).

- Dependiendo de su deflexión y radio de curvatura las curvas horizontales pueden requerir placas-huella de anchos mayores. En la presente Guía se han establecido para las placas-huella en curva tres valores de ancho: noventa centímetros (0,90 m), un metro con treinta y cinco centímetros (1,35 m) y un metro con ochenta centímetros (1,80 m).

- El espesor de la placas-huella es de quince centímetros (0,15 m).

- Las funciones de la placa-huella son:

  - Soportar los esfuerzos que se producen por el paso de los ejes de los vehículos.

  - Canalizar la circulación vehicular permitiendo sustituir en las franjas de la sección transversal no sometidas al paso de los ejes un material relativamente costoso como es el concreto simple por uno más económico como lo es la piedra pegada (concreto ciclópeo). Lo anterior se traduce en una menor inversión.

1.4.3.2 Riostra

La riostra es una viga transversal de concreto reforzado en la que su acero de refuerzo se entrecruza con el acero de refuerzo de la placa-huella del módulo anterior y con el acero de refuerzo de la placa-huella del módulo siguiente.

- El ancho de la riostra es de veinte centímetros (0,20 m).

- El peralte de la riostra es de treinta centímetros (0,30 m). Dicha riostra se apoya totalmente sobre la superficie existente, es decir en la superficie sobre la que se construye la subbase, previa la colocación de un solado de limpieza de tres centímetros (0,03 m) de espesor.

  Lo anterior implica:

0004401 17 OCT 2017

- Excavar, en la subbase, una zanja transversal de veinte centímetros (0,20 m) de ancho y dieciocho centímetros (0,18 m) de profundidad en la sección donde se debe construir la riostra.

- Lo anterior se requiere para compensar la diferencia entre el peralte de la riostra + el solado de limpieza y el espesor de la placa-huella (0,33 m - 0,15 m) = 0,18 m.

- Se aclara que la subbase se extiende, se conforma y se compacta en toda su longitud y ancho y posteriormente se procede a construir las zanjas transversales para alojar las riostras.

- La longitud de la riostra es variable y se ajusta al ancho de la sección transversal sea ésta en tangente, en curva, en transición del sobreancho o en Zona de Cruce. Esta última es un tramo en tangente cuya sección transversal se ha ampliado para permitir el cruce de dos vehículos grandes como son los camiones y los buses.

- La función de la riostra es exclusivamente de confinamiento transversal y longitudinal de los elementos del pavimento que se construyen sobre la subbase como son las placas-huella, la piedra pegada, la berma-cuneta y el bordillo. Dado que el acero de refuerzo de la placa-huella anterior pasa a través de la riostra y se traslapa con el acero de refuerzo de la placa-huella siguiente son éstas placas-huella, que están totalmente apoyadas sobre la subbase, las que "sostienen" la riostra por lo que la rigidez de su apoyo resulta irrelevante.

1.4.4 Piedra pegada

La piedra pegada es una capa de concreto ciclópeo con espesor de quince centímetros (0,15 m).

Las funciones de la piedra pegada son:

- Disminuir los costos de construcción del pavimento ya que es un material menos costoso que el concreto simple.

- Propiciar la canalización del tránsito dado que la alta rugosidad que presenta la piedra pegada desestimula a los conductores a circular por fuera de las placas-huella que son los elementos diseñados para soportar los esfuerzos producidos por el paso de los vehículos.

- Contribuir a la estética del camino.

1.4.5 Berma-cuneta y bordillo

La Berma-cuneta y el bordillo son elementos de drenaje superficial construidos en concreto reforzado, fundidos monolíticamente y articulados estructuralmente con la riostra.

La razón de fundir monolíticamente la berma-cuneta y el bordillo es evitar la junta de construcción que se formaría en la frontera entre ambos elementos, junta que con el paso del tiempo se convertiría en una fisura que permitiría la infiltración del agua que correría por la berma-cuneta con el consecuente deterioro del pavimento.

27

0004401 17 OCT 2017

Las funciones de la Berma-cuneta y el bordillo son:

- Servir como franja de estacionamiento temporal en el caso de que un vehículo lo requiera por fallas mecánicas u otra causa de fuerza mayor permitiendo que el flujo vehicular no se interrumpa totalmente.
- Permitir la recolección de las aguas lluvias y conducirlas hasta las alcantarillas y aliviaderos para su evacuación.
- Brindar confinamiento a la subbase.

1.4.6 Otros elementos de drenaje superficial y subdrenaje

Adicionalmente a las berma-cunetas el pavimento debe complementarse con alcantarillas y aliviaderos así como con subdrenes en el caso de que sean requeridos.

1.5 La sección transversal recomendada por la Guía

La razón principal para la recomendación de la sección transversal descrita en los numerales 1.6 y 1.7 siguientes es, como ya se manifestó reiteradamente en el numeral 1.1 del presente capítulo, evitar hasta donde sea posible que los vehículos, especialmente camiones y buses, circulen sobre las franjas de piedra pegada.

1.6 Sección transversal en tangente

En la Figura 1.2 descrita en el numeral 1.4 del presente documento se puede observar la vista en planta y el perfil de la sección transversal en tangente.

1.7 Sección transversal en curvas horizontales

1.7.1 Peralte

Tomando en consideración que en las vías pavimentadas con Placa-huella la velocidad de los vehículos es baja y que además los tramos rectos entre una curva y la siguiente (entretangencia) con frecuencia son muy cortos, situación que dificulta la transición del bombeo al peralte, se ha adoptado para todas las curvas horizontales, independientemente del valor de su radio, el valor único de dos por ciento (2%).

La transición del bombeo en la tangente (-2%) al peralte en la curva (2%) se debe realizar de la siguiente manera:

- En las curvas que no requieran sobreancho la transición del peralte se debe hacer en una longitud entre tres (3) y seis (6) metros antes del PC y entre tres (3) y seis (6) metros después del PT, según la disponibilidad de espacio.
- En las curvas con sobreancho la transición del peralte se debe hacer en la longitud de transición del sobreancho indicada en la Tabla 1.1, que varía entre 3, 6 y 9 metros.

1.7.2 Sobreancho

Utilizando software especializado se determinó la trayectoria de las ruedas del camión C-3 recorriendo

0004401 17 OCT 2017

curvas circulares simples con diferentes combinaciones de deflexión y radio de curvatura. La memoria de cálculo del estudio realizado está consignada en el Anexo 1, documento entregado al Instituto Nacional de Vías como soporte de los resultados que se consignan en la presente Guía.

1.7.3 Curvas tipo en función de la deflexión y el radio de la curva

El análisis comentado en el numeral anterior permitió establecer doce (12) tipos de secciones transversales en curva dependiendo de su deflexión y su radio. Los resultados se presentan en la Tabla 1.1 y en las Figuras 1.3 a 1.14.

Curva tipo	Figura No.	Radio (m)	Deflexión Δ, en grados	Berma-cuneta exterior (m)	Piedra pegada exterior (m)	Placa-huella exterior (m)	Piedra pegada central (m)	Placa-huella interior 1 (m)	Placa-huella interior 2 (m)	Piedra pegada interior (m)	Berma-cuneta interior (m)	Ancho total calzada (m)	Longitud transición total (m)	Longitud transición sobreancho (m)
1	1.3	> 150	Δ <= 150	0.70	0.45	0.90	0.90	0.90	0.00	0.45	0.70	5.00	0	0
2	1.4	80<R<=150	Δ <= 150	0.70	0.45	1.35	0.45	1.35	0.00	0.00	0.70	5.00	6	0
3	1.5	60<R<=80	Δ <= 150	0.70	0.45	1.35	0.45	1.35	0.00	0.00	0.70	5.00	9	0
4	1.6	40<R<=60	Δ <= 150	0.70	0.45	1.35	0.45	1.35	0.00	0.00	0.70	5.00	12	0
5	1.7	30<R<=40	Δ <= 150	0.70	0.45	1.80	0.00	1.80	0.00	0.00	0.70	5.45	12	3
6	1.8	25<R<=30	Δ <= 150	0.70	0.45	1.80	0.00	1.80	0.00	0.00	0.70	5.45	15	3
7	1.9	20<R<=25	Δ <= 45	0.70	0.45	1.80	0.00	1.80	0.00	0.00	0.70	5.45	15	3
8	1.10	20<R<=25	45 < Δ <= 150	0.70	0.45	1.80	0.00	0.90	1.35	0.00	0.70	5.90	15	3
9	1.11	11<=R<=20	Δ <= 30	0.70	0.45	1.80	0.00	1.80	0.00	0.00	0.70	5.45	15	3
10	1.12	11<=R<=20	30 < Δ <= 45	0.70	0.45	1.80	0.00	0.90	1.35	0.00	0.70	5.90	15	6
11	1.13	11<=R<=20	45 < Δ <= 90	0.70	0.45	1.80	0.00	0.90	1.80	0.00	0.70	6.35	18	9
12	1.14	11<=R<=20	90 < Δ <= 150	0.70	0.45	1.80	0.00	1.35	1.80	0.00	0.70	6.80	21	9

Tabla 1.1 Curvas tipo en función de la deflexión y el radio de la curva

Para su interpretación es necesario manifestar lo siguiente:

a) El ancho adicional (sobreancho) que requiere la calzada en la curva se aplica de PC a PT y fluctúa entre 0,45 m y 1,80 m.

b) En todos los casos la berma-cuneta queda por fuera de la trayectoria de las ruedas, es decir que las berma-cunetas no son zona de circulación en las curvas.

c) Para facilitar la construcción se han establecido franjas de placa-huella de los siguientes anchos: 0,90 m, 1,35 m y 1,80 m.

d) En las curvas horizontales con deflexión relativamente baja y radio relativamente grande el ancho adicional requerido por las placas-huella se suministra disminuyendo el ancho de la piedra pegada y ese mismo ancho adicionándolo al ancho de la placa-huella adyacente.

A medida que la deflexión de la curva es mayor y/o el radio es menor se llega a un punto en que ya toda la franja central de piedra pegada se ha eliminado y su ancho adicionado a la placa-huella exterior. Igualmente, la franja de piedra pegada interior incorporada a la placa-huella interior. Hasta éste punto NO se ha suministrado sobreancho a la calzada y ésta sigue siendo de cinco (5) metros.

El ancho adicional que requieren las placas-huella por la trayectoria de las ruedas de los camiones se ha solucionado de la siguiente manera:

- Incrementando paulatinamente la sustitución de piedra pegada por placa-huella.
- Incrementando paulatinamente la longitud en la tangente (antes del PC y después del PT) en que se realiza la sustitución de piedra pegada por placa-huella. En la Tabla 1.1 esta longitud se

0004401 17 OCT 2017

denomina "Longitud transición total".

Lo descrito en este literal aplica, en la Tabla 1.1, a las curvas Tipo 1 a Tipo 4.

e) Cuando, por la combinación de deflexión y radio, la curva se va haciendo más crítica, la calzada de cinco (5) metros resulta insuficiente siendo necesario suministrarle ancho adicional (sobreancho) con incrementos de 0,45 metros. Éste es el caso de las Curva Tipo 5 a Tipo 12 consignadas en la Tabla 1.1.

A título de ejemplo, en la Curva Tipo 5 se requiere aumentar el ancho de la calzada a cinco metros con cuarenta y cinco centímetros (5,45 m). Ya en la Curva Tipo 4 el ancho de la placa-huella interior es de 1,35 metros y si la Curva Tipo 5 necesita 0,45 metros más de ancho entonces la placa-huella interior debe ser de 1,80 metros de ancho. Dado que en la presente Guía se permiten placas-huella hasta de 1,80 metros de ancho, y con el propósito de minimizar el número de juntas longitudinales de construcción, se establece que la placa-huella interior tenga 1,80 metros de ancho.

También, a título de ejemplo, en la Curva Tipo 11 se requiere aumentar el ancho de la calzada a seis metros con treinta y cinco centímetros (6,35 m), es decir, proporcionar un ancho adicional (sobreancho) de 1,35 metros. Ya para la combinación de deflexión y radio de esta curva la franja de piedra pegada central ha sido adicionada a la placa-huella exterior y la franja de piedra pegada interior ha sido adicionada a la placa-huella interior.

La placa-huella interior queda:

- Placa-huella en tangente: 0,90 m
- Sustitución de la piedra pegada interior: 0,45 m
- Ancho adicional: 1,35 m

La suma de las franjas anteriores indica que el ancho de la placa-huella interior es de 2,70 metros. Como este ancho es mayor de 1,80 metros se divide en dos franjas de placas-huella, así:

- Placa-huella interior 1 : 0,90 m
- Placa-huella interior 2 : 1,80 m

Respecto a la partición anterior se debe manifestar lo siguiente:

- Se aprovecha el máximo el ancho de la placa-huella por lo que resulta una única junta longitudinal de construcción.
- Para evitar el problema de fisuras en las placas-huella anteriores y posteriores a la sección donde se realizó el cambio de ancho debido a que las juntas longitudinales de construcción ya no coincidirían ES INDISPENSABLE hacer una junta transversal de construcción. Dicha junta se debe construir en todas las secciones donde la modulación implique cambio en el ancho de la franja de placas-huella.

f) La última columna de la Tabla 1.1 denominada "Longitud transición sobreancho" corresponde a la longitud, antes del PC y después del PT, en que se realiza la transición del ancho adicional de la calzada. Hasta donde inicia dicha transición la calzada tiene cinco (5) metros de ancho, independientemente que desde unos metros atrás se haya iniciado la sustitución de piedra pegada por placa-huella. Como ya se manifestó en el literal d) la distancia desde la sección donde se debe iniciar la mencionada sustitución hasta el PC de denomina en la Tabla1.1 "Longitud transición total ".

0004401 17 OCT 2017

En las Figuras 1.3 a 1.14 se presenta la modulación de las placas-huella en la longitud de transición del sobreancho.

En ellas se puede observar que la modulación está planteada de tal forma que todas las placas-huella tienen forma rectangular o trapezoidal. Es pertinente manifestar que se ha evitado la construcción de franjas de placas-huella rectangulares de 0,45 metros de ancho no obstante que el ancho de la franja interior de piedra pegada es de 0,45 metros y el incremento en el ancho de la calzada (sobreancho) se realiza con valores de 0,45 metros. Lo anterior obedece a que a menor ancho de la placa-huella mayores son los esfuerzos que le produce el paso del eje tándem de 22 toneladas. También se han evitado las cuñas triangulares al inicio de la transición.

La "Longitud transición sobreancho", de cero metros en la tangente al valor total requerido en el PC de la curva, se presenta aproximada a múltiplos de tres (3) metros que es la longitud del módulo placa-huella y riostra en la tangente.

g) Para una adecuada visualización de la modulación de las placas-huella se debe consultar las Figuras 1.3 a 1.14 en el archivo de AUTOCAD anexo a la presente Guía denominado "Modulación de placas-huella". Lo anterior debido a que en éste archivo las figuras se pueden ampliar, sin perder nitidez, tanto como sea necesario para interpretar correctamente el diseño.

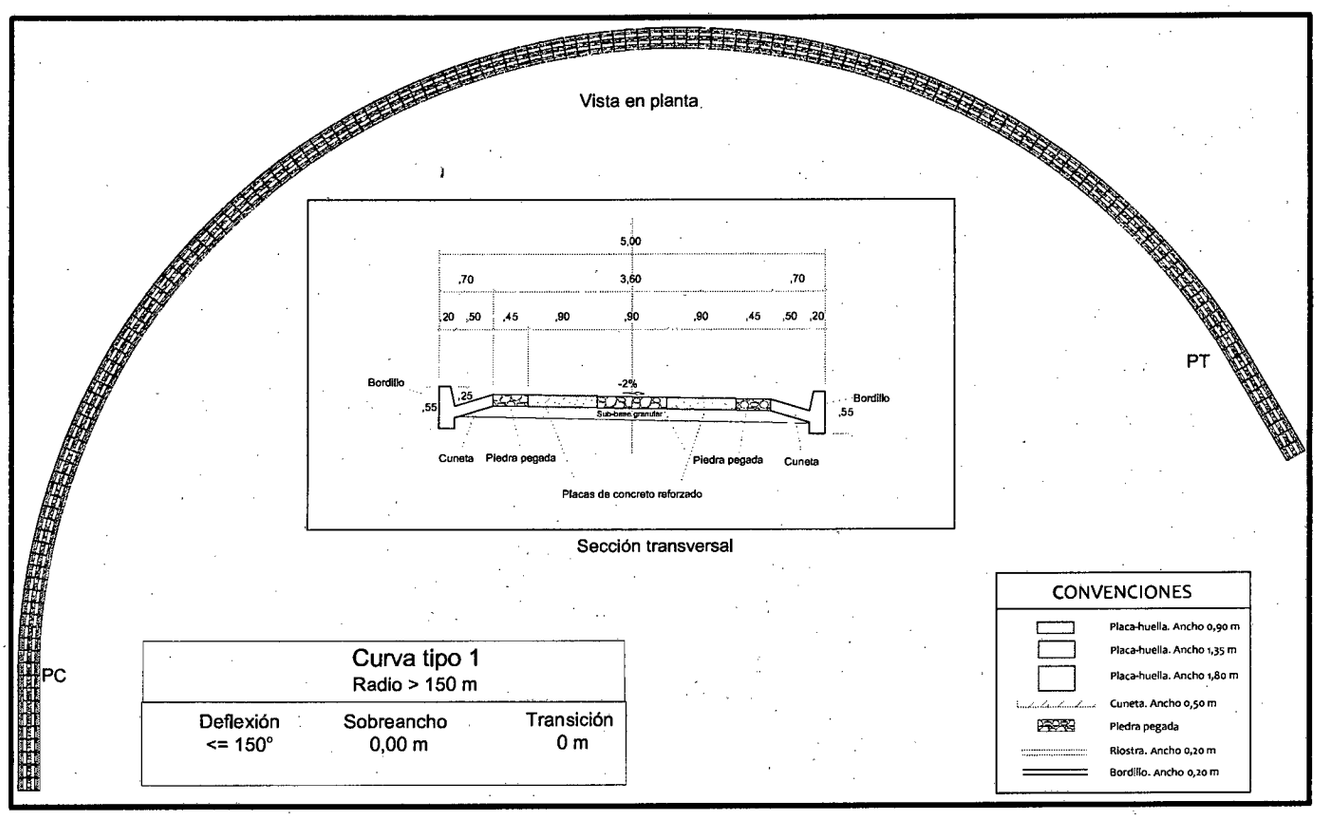


Figura 1.3 Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 1 $\Delta \leq 150°$ y $Rc > 150$ m

31

0004401 17 OCT 2017

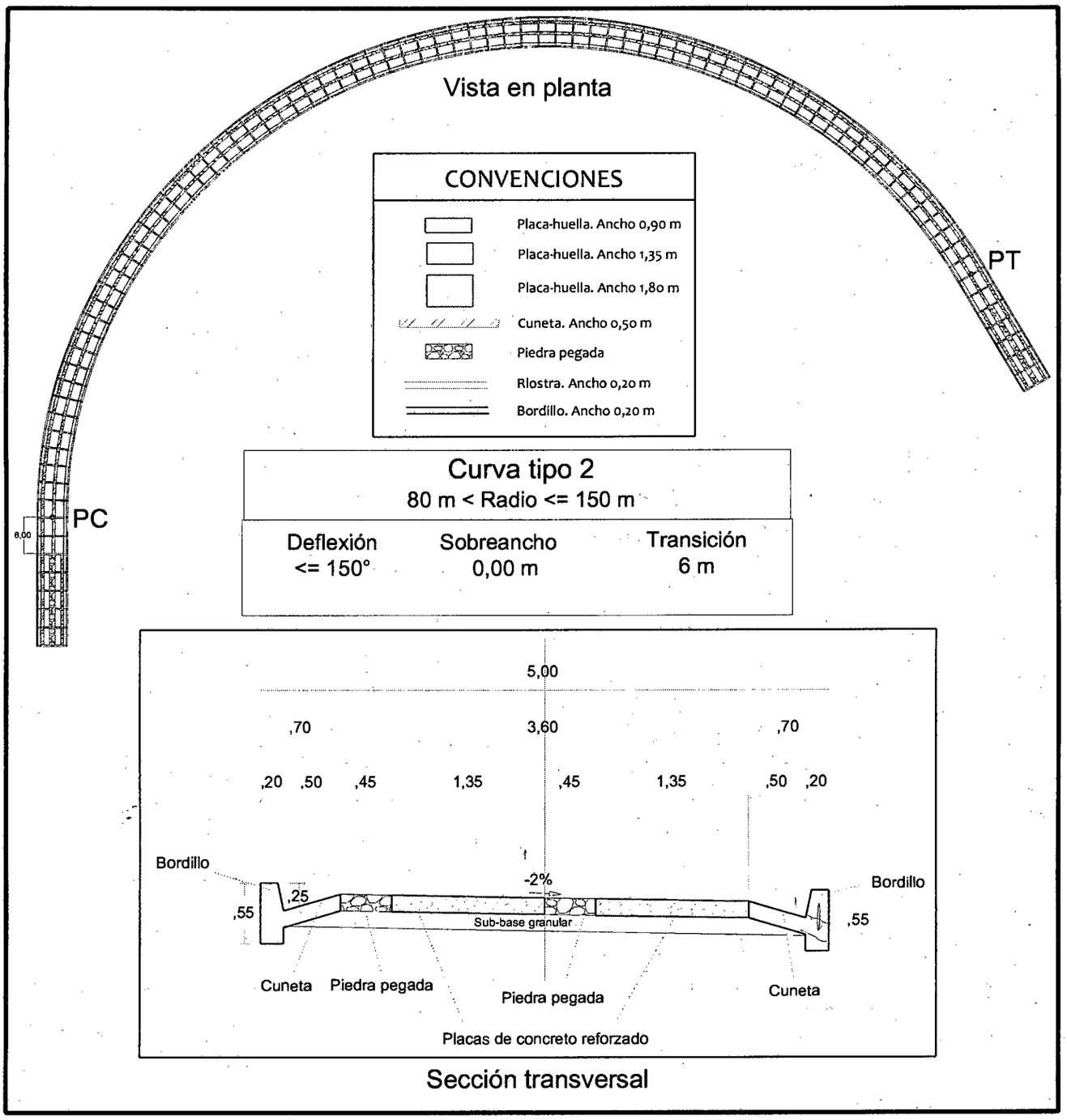


Figura 1.4 Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 2 $\Delta \leq 150°$ y $80\,m < Rc \leq 150\,m$

32

0004401 17 OCT 2017

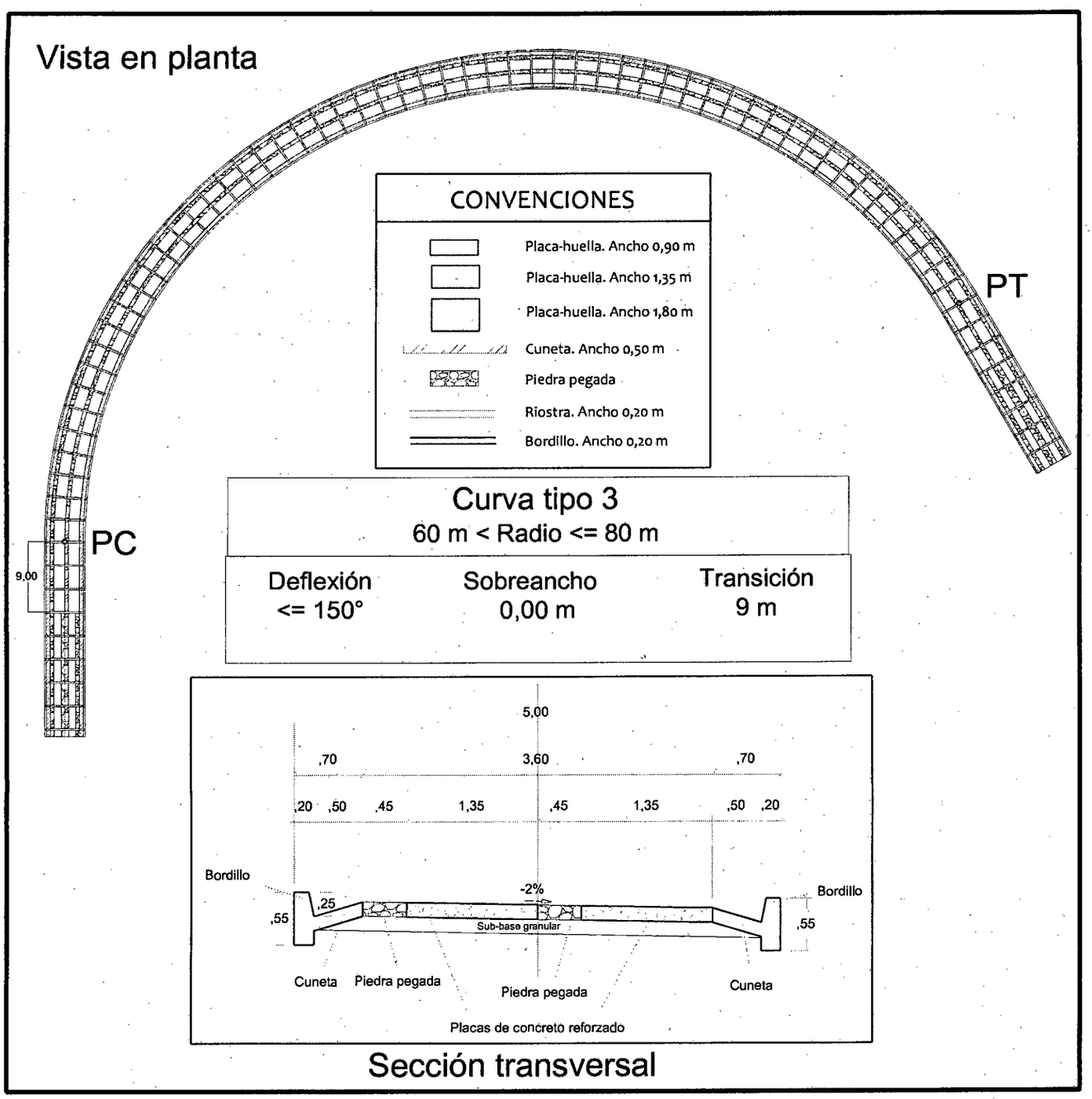


Figura 1.5 Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 3 $\Delta \leq 150°$ y $60\,m < Rc \leq 80\,m$

0004401 17OCT2017

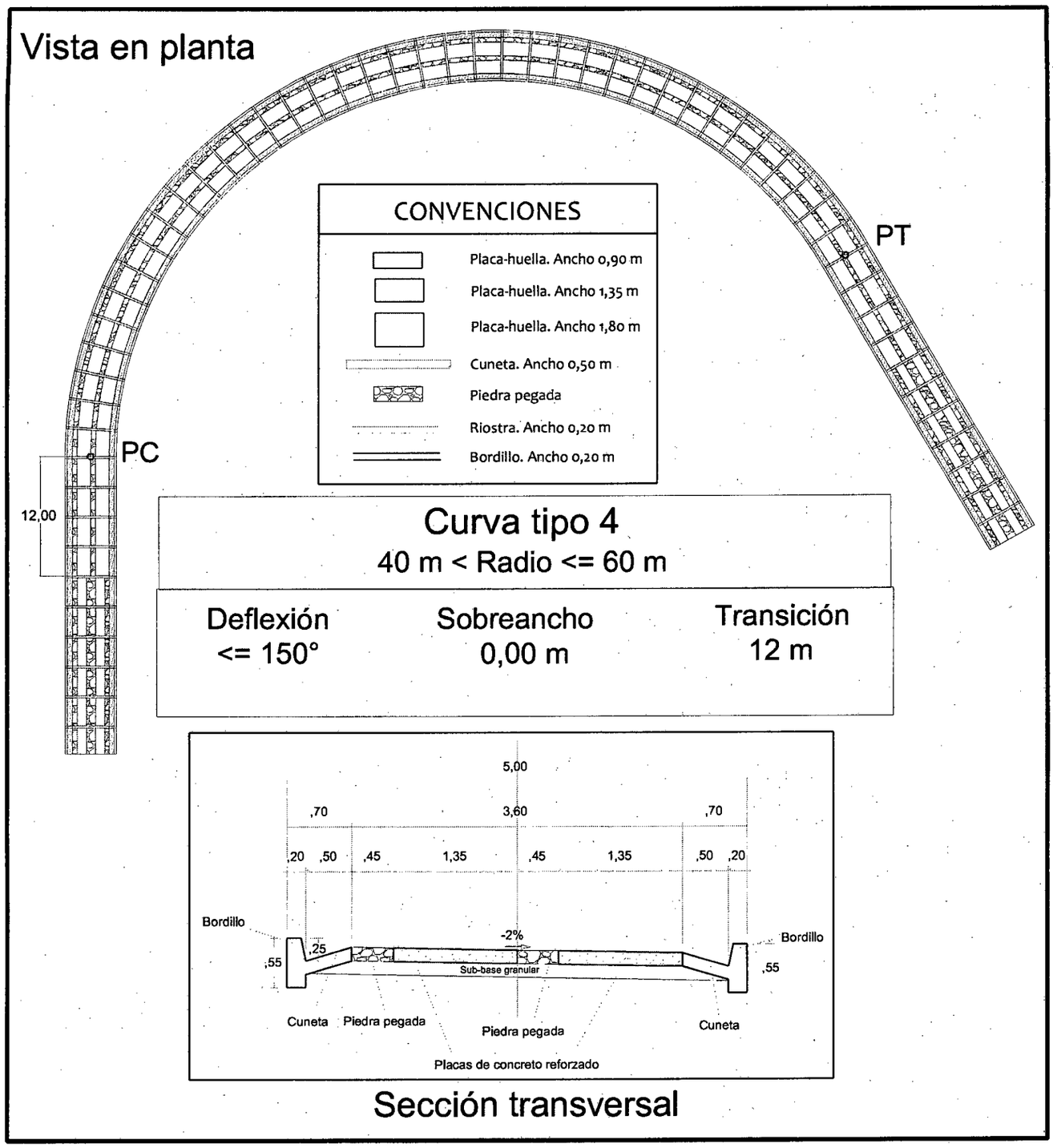


Figura 1.6 Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 4 $\Delta \leq 150°$ y $40\,m < Rc \leq 60\,m$

34

0004401 17OCT2017

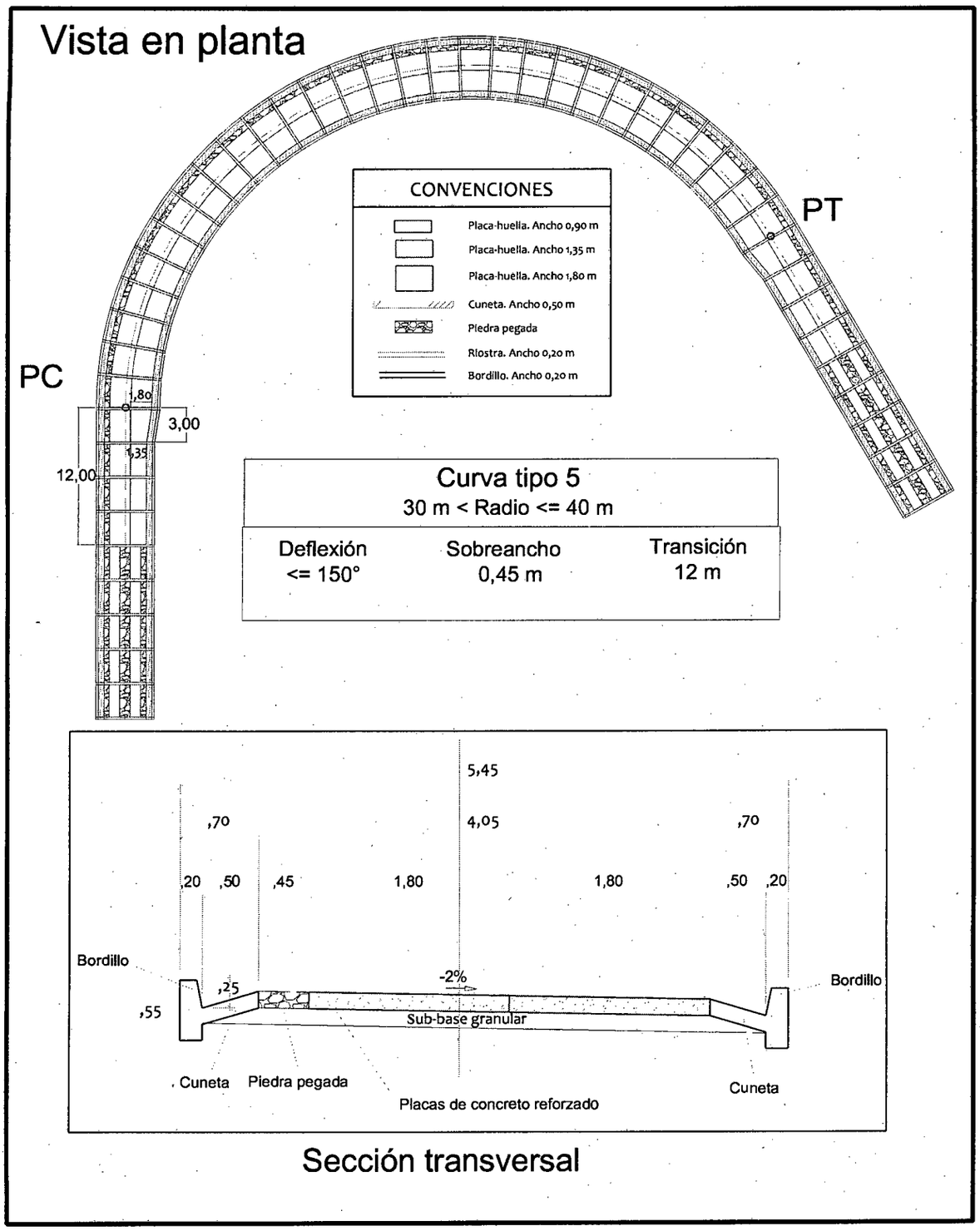


Figura 1.7 Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 5 $\Delta \leq 150°$ y $30\,m < Rc \leq 40\,m$

35

0004401 17 OCT 2017

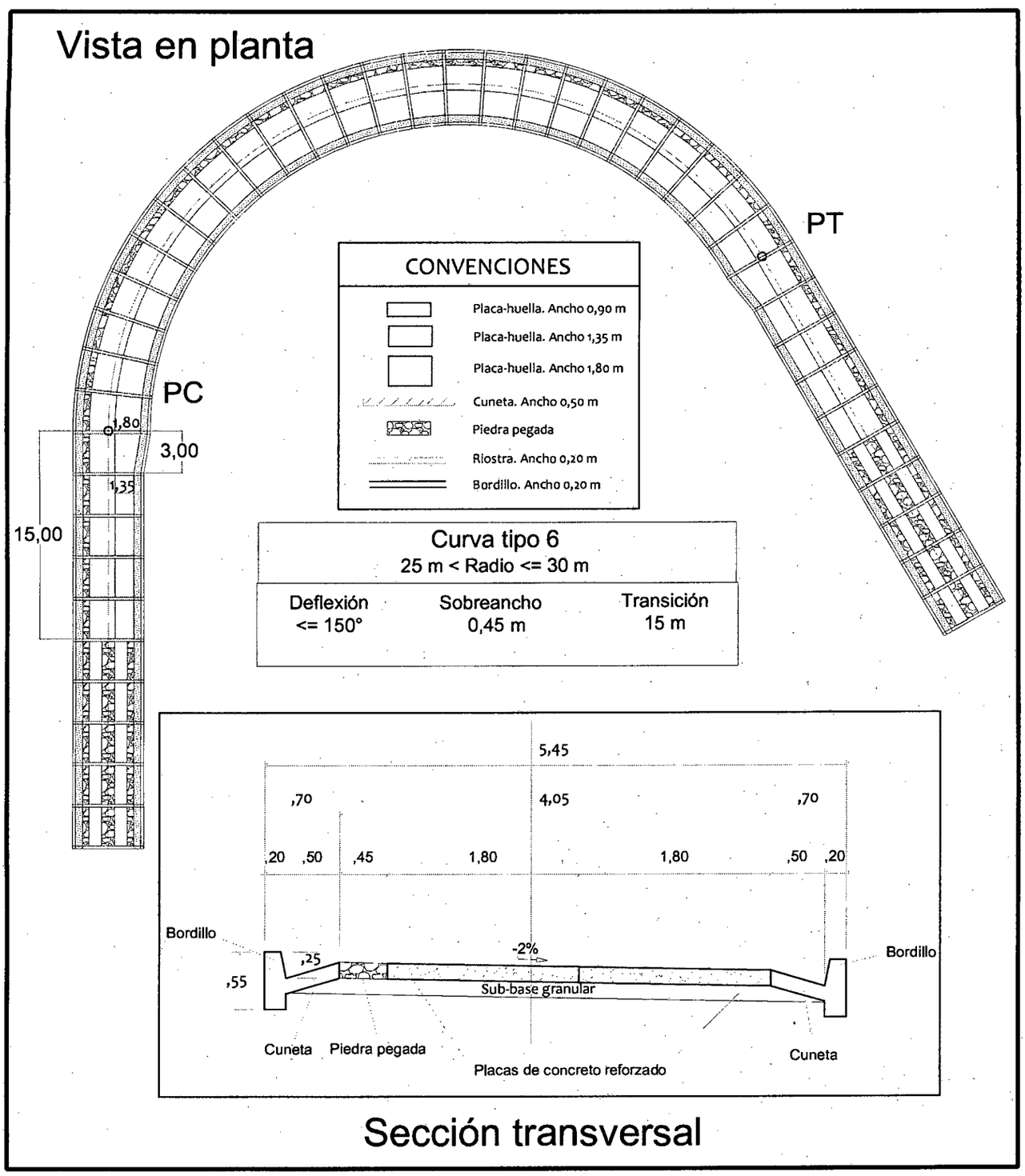


Figura 1.8 Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 6 $\Delta \leq 150°$ y $25\ m < Rc \leq 30\ m$

36

0004401 17 OCT 2017

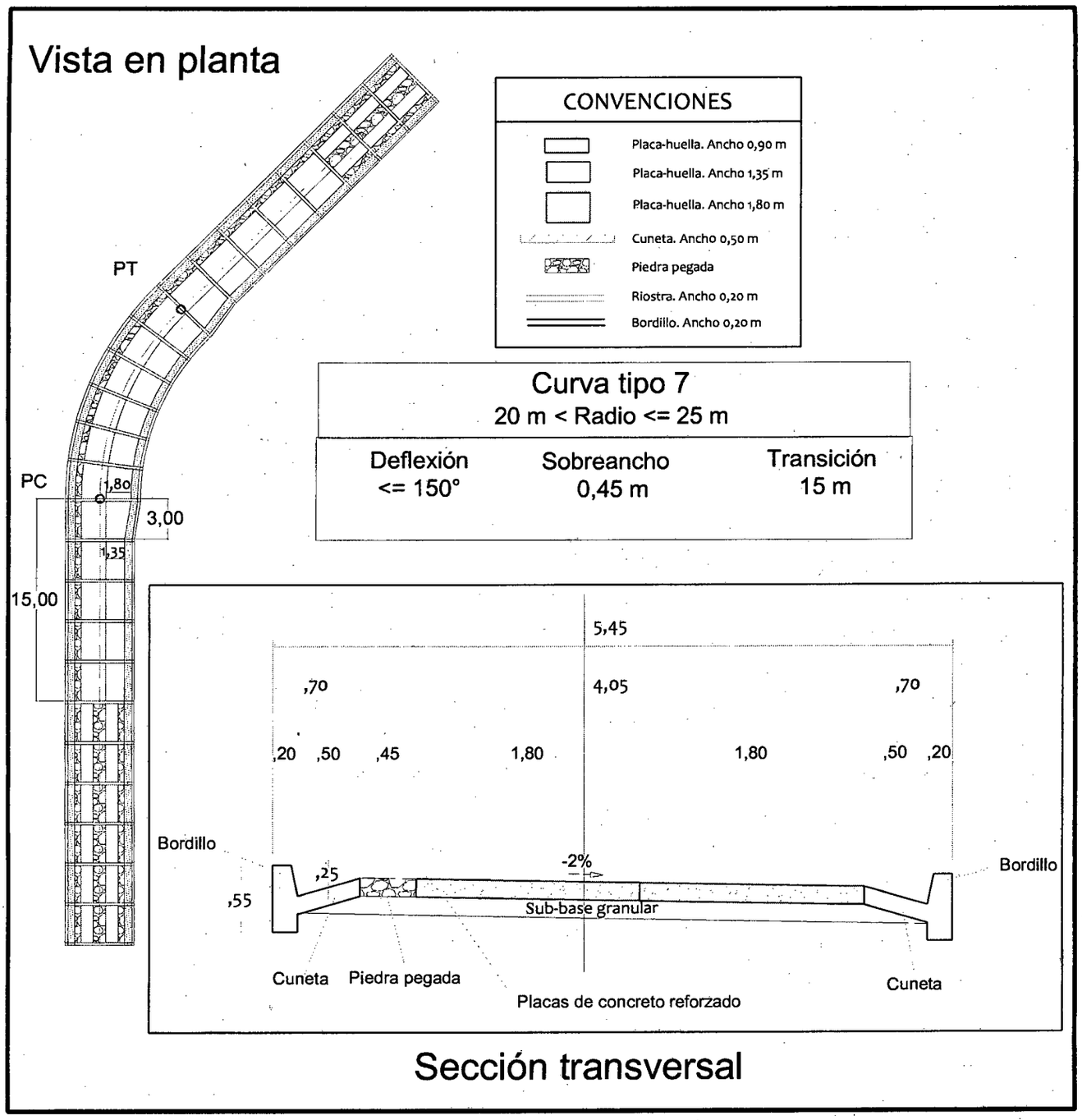


Figura 1.9 Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 7 $\Delta \leq 45°$ y $20\,m < Rc \leq 25\,m$

0004401 17OCT2017

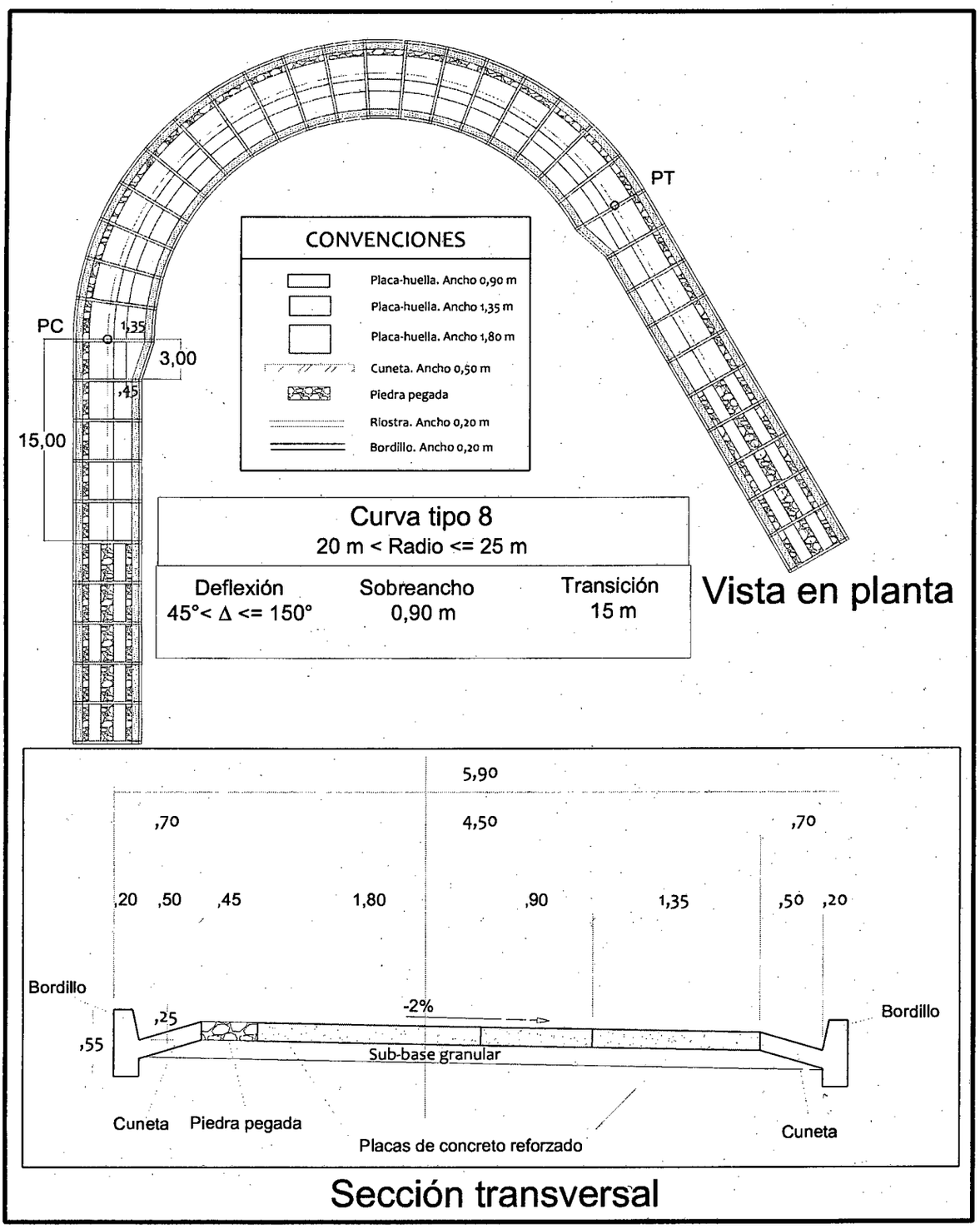


Figura 1.10 Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 8 $45 < \Delta \leq 150°$ y $20\,m < Rc \leq 25\,m$

38

0004401 17 OCT 2017

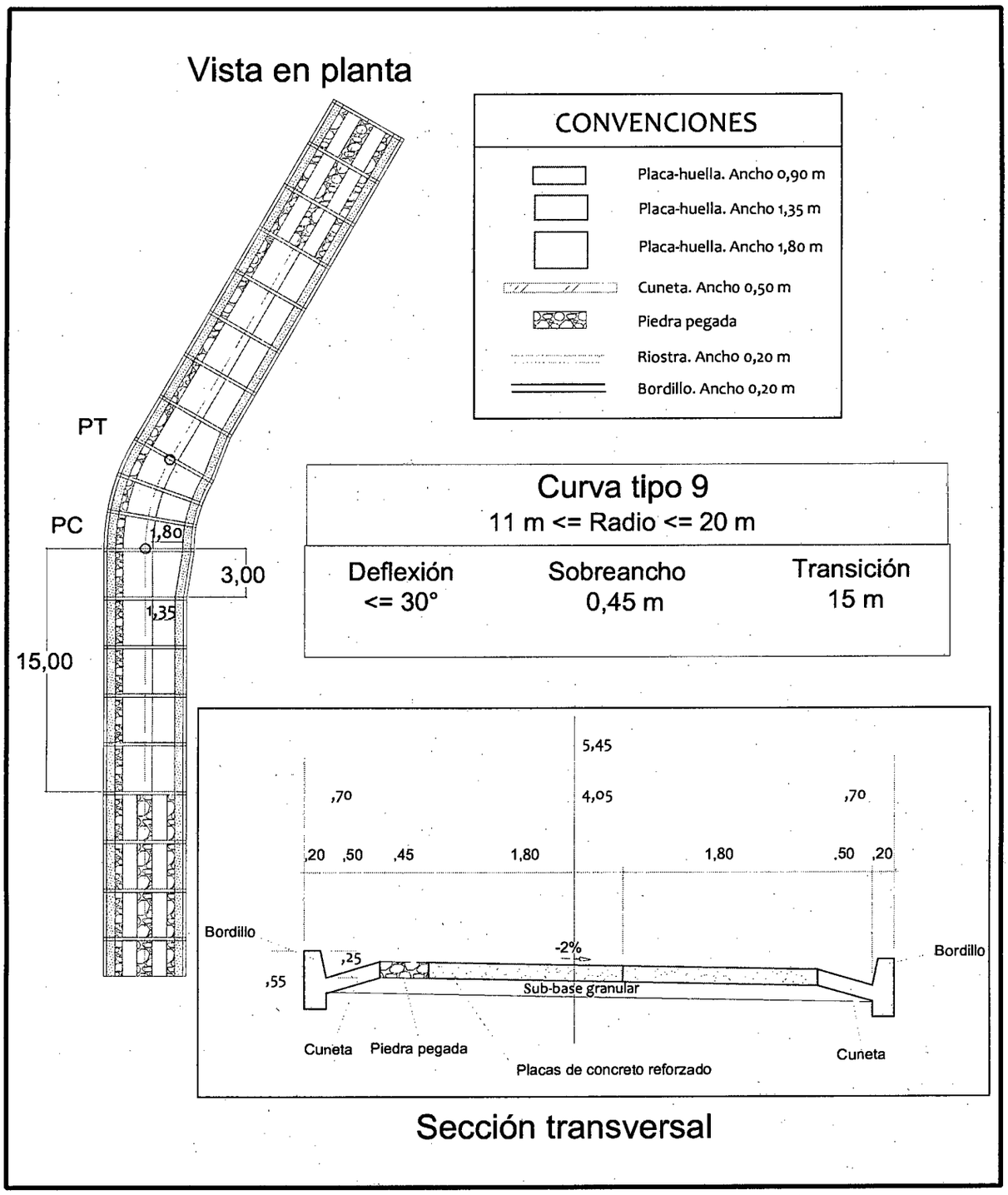


Figura 1.11 Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 9 $\Delta \leq 30°$ y $11\,m \leq Rc \leq 20\,m$

0004401 17 OCT 2017

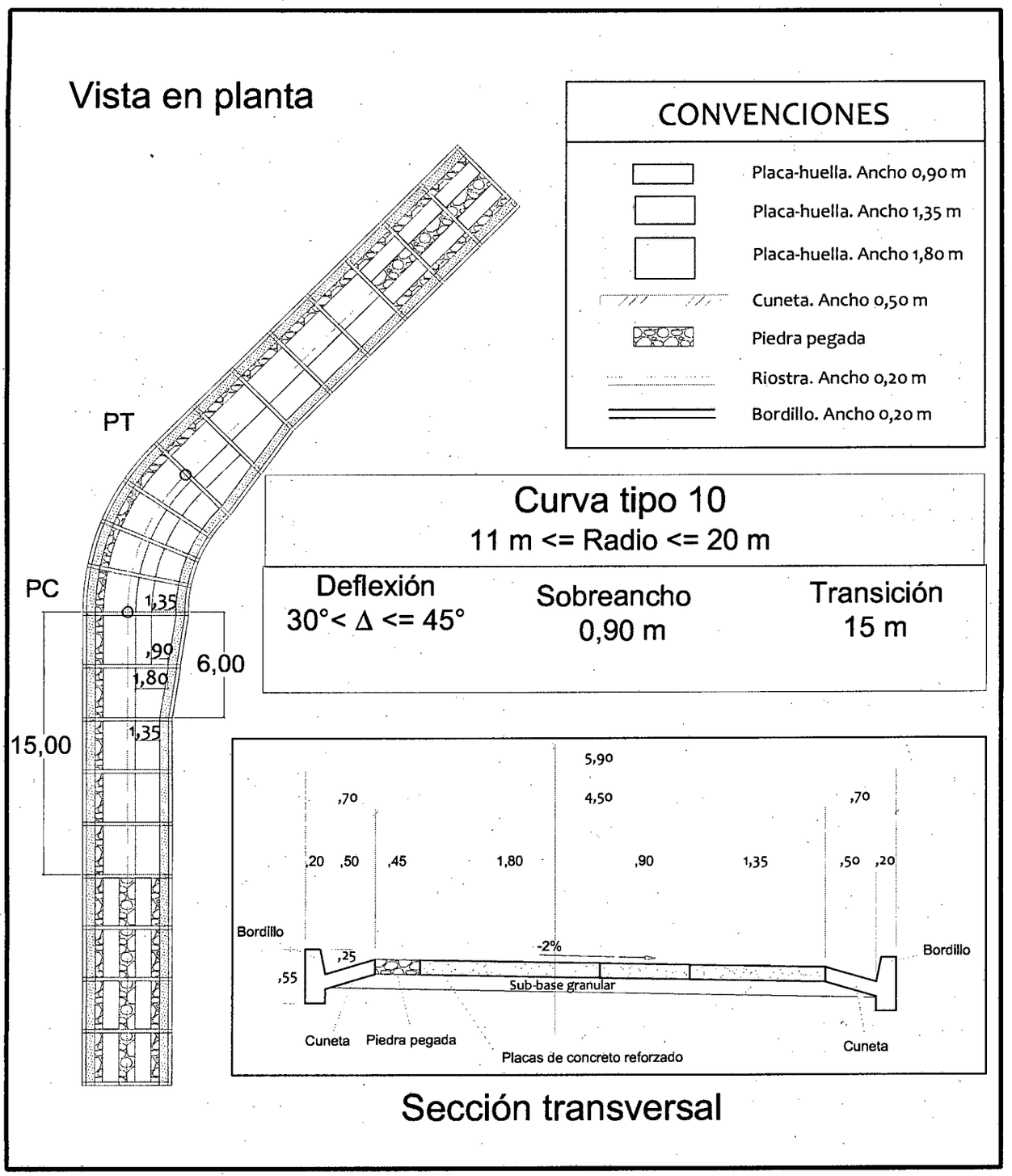


Figura 1.12 Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 10 $30 < \Delta \leq 45°$ y $11\,m \leq Rc \leq 20\,m$

0004401 17 OCT 2017

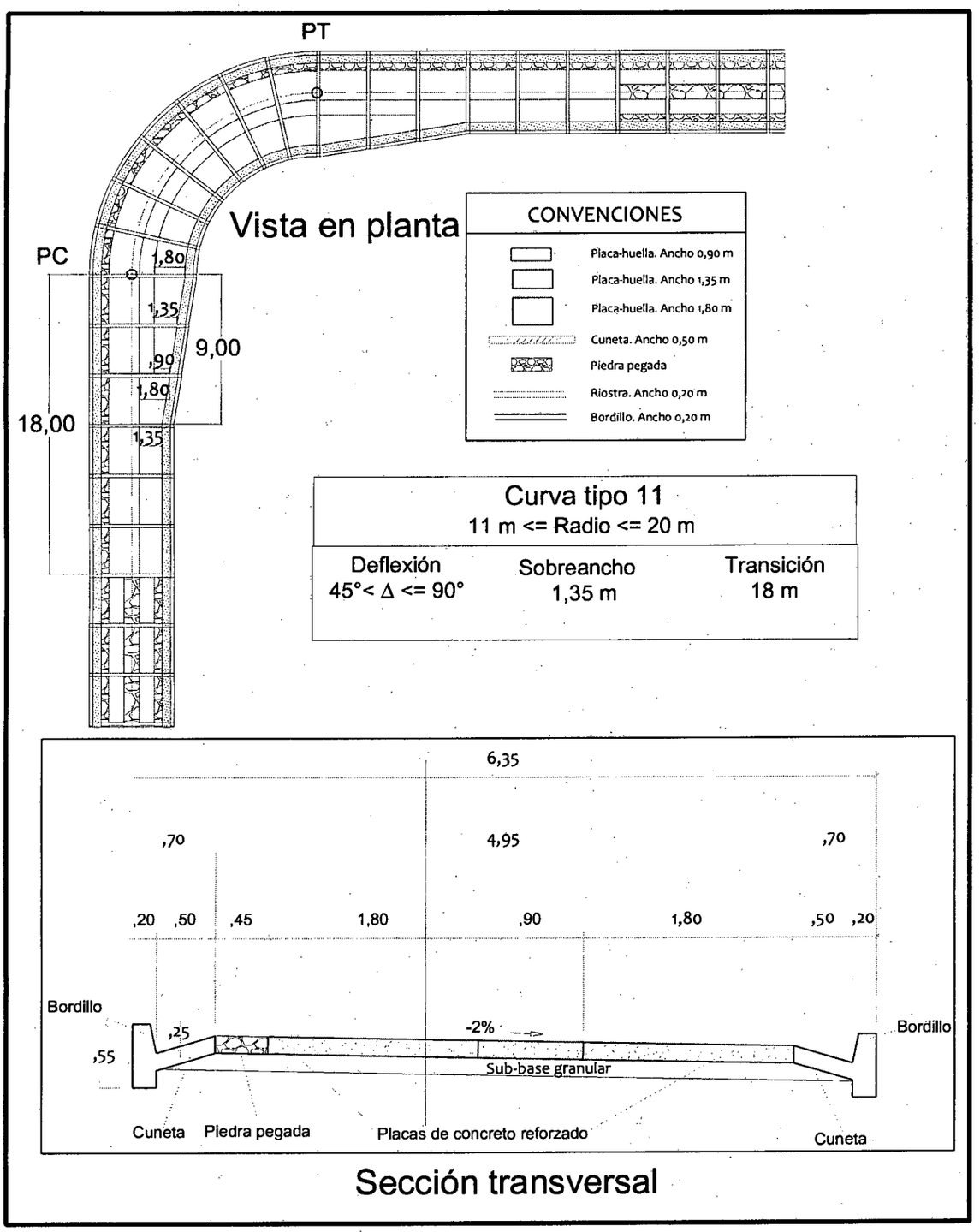


Figura 1.13 Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 11 $45 < \Delta \leq 90°$ y $11\ m \leq Rc \leq 20\ m$

0004401 17 OCT 2017

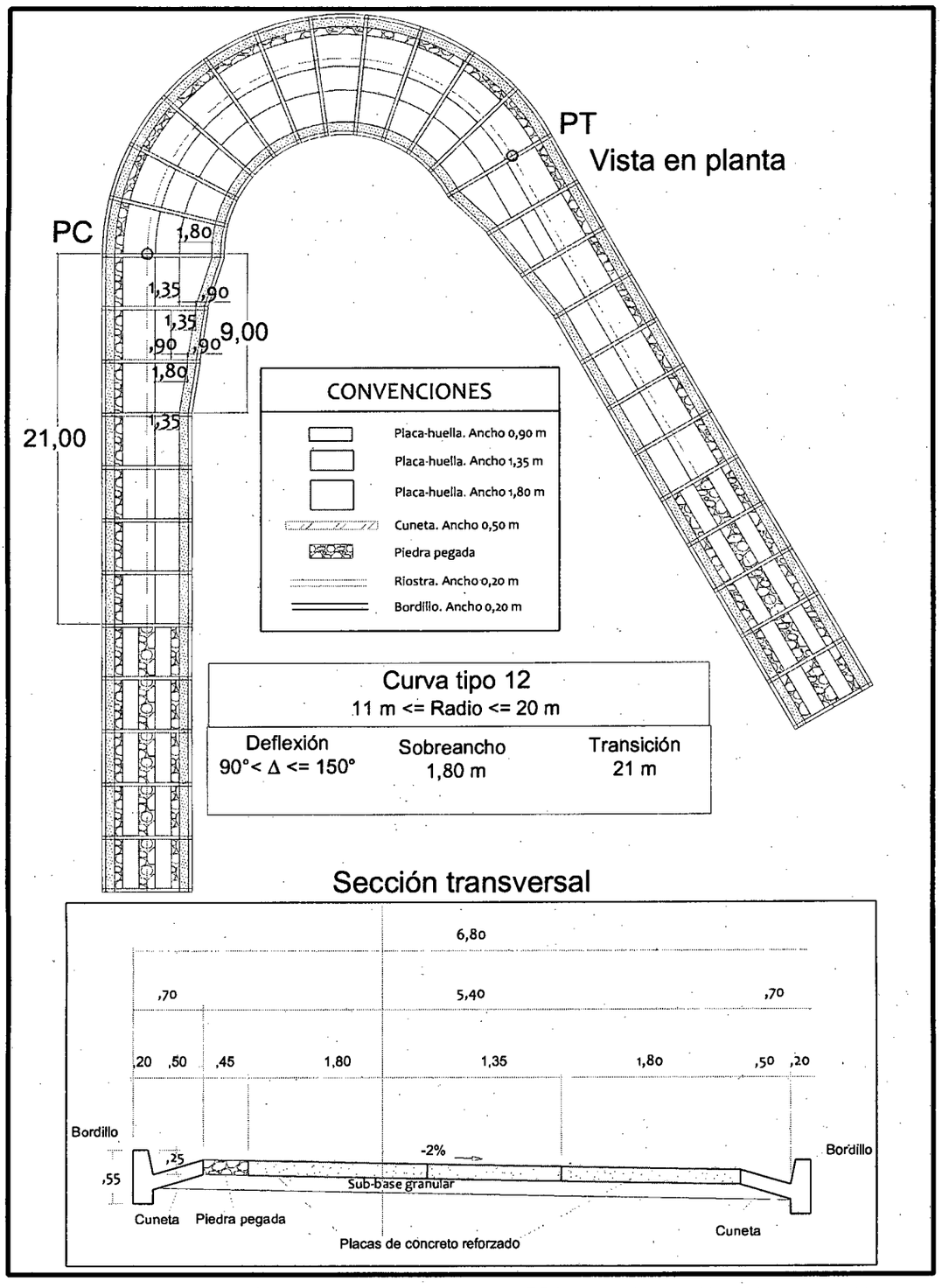


Figura 1.14 Vista en planta y perfil de la sección transversal en curvas TIPO 12 $90 < \Delta \leq 150°$ y $11\ m \leq Rc \leq 20\ m$

42

0004401 17 OCT 2017

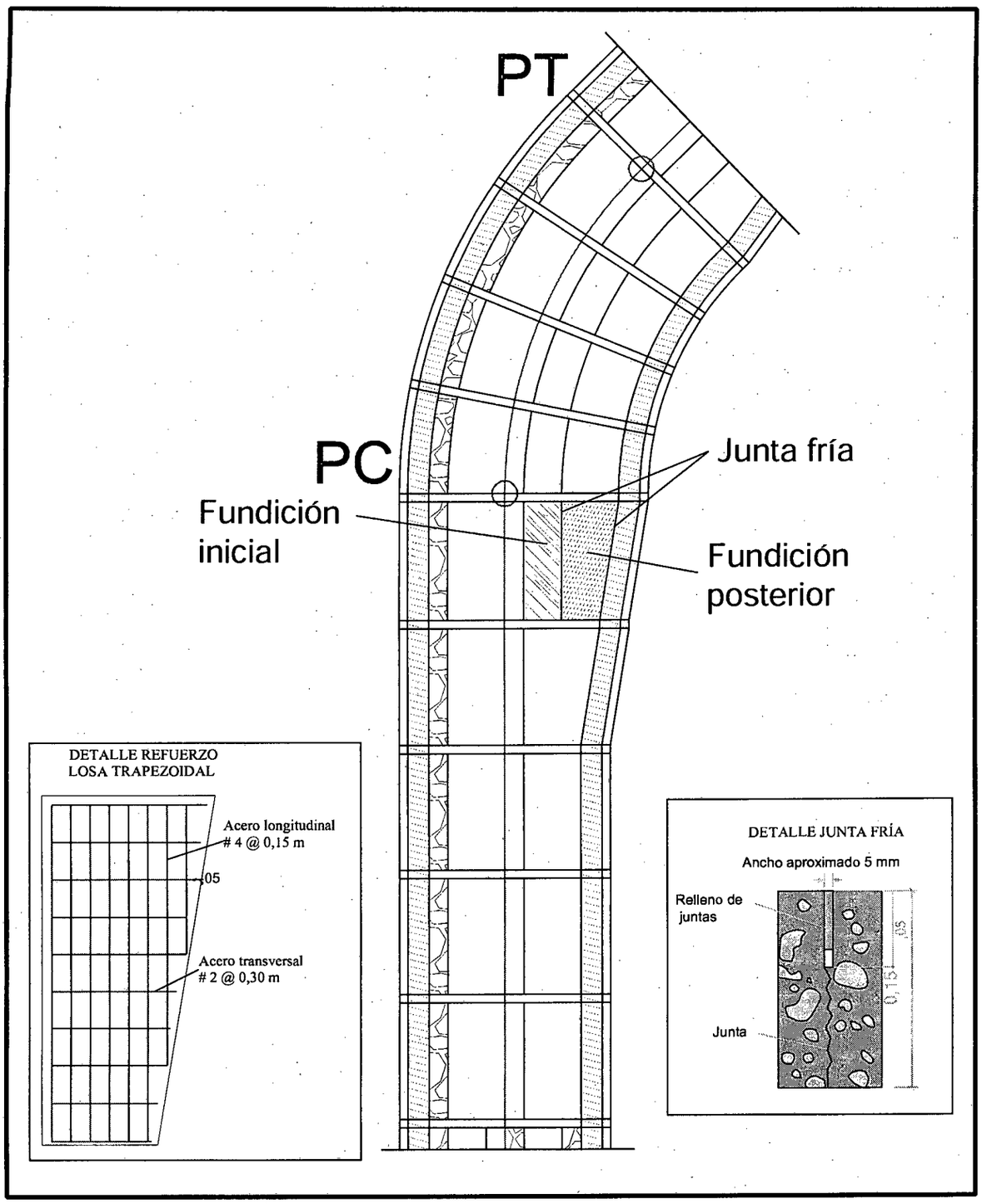


Figura 1.15 Vista en planta de la modulación de placas-huella y riostras en la curva TIPO 10

0004401 17OCT2017

1.8 Sección transversal en Zonas de Cruce

Tal como se ha indicado en los numerales anteriores la sección transversal en tangente tiene cinco (5) metros de ancho. Con este ancho en cualquier punto de una tangente (no en las curvas) se pueden cruzar un camión o un bus con un vehículo liviano siendo esta maniobra posible pero indeseable.

El cruce de un camión o bus con otro camión o bus no es posible en una sección de cinco (5) metros de ancho por lo que obligatoriamente deben hacer uso de los tramos en tangente cuya sección transversal es más amplia y adecuada para efectuar dicho cruce. Estos tramos se denominan Zona de Cruce.

En cada tangente se debe proporcionar al menos una Zona de Cruce tratando de localizarla en la parte central de dicha tangente. Si la tangente es larga se debe proporcionar más de una Zona de Cruce sin que el espaciamiento entre una y otra supere doscientos (200) metros. La anterior recomendación obedece a la conveniencia de que un vehículo no se vea forzado a reversar una distancia en tangente mayor a cien (100) metros.

La presente Guía propone dos alternativas de la Zona de Cruce:

- ALTERNATIVA UNO
  Se indica en la Figura 1.16 y es apropiada cuando el tramo elegido presenta restricciones en el ancho de la banca pero no en longitud.

- ALTERNATIVA DOS
  Se indica en la Figura 1.17 y es apropiada cuando el tramo elegido no presenta restricciones en el ancho de la banca pero sí en longitud.

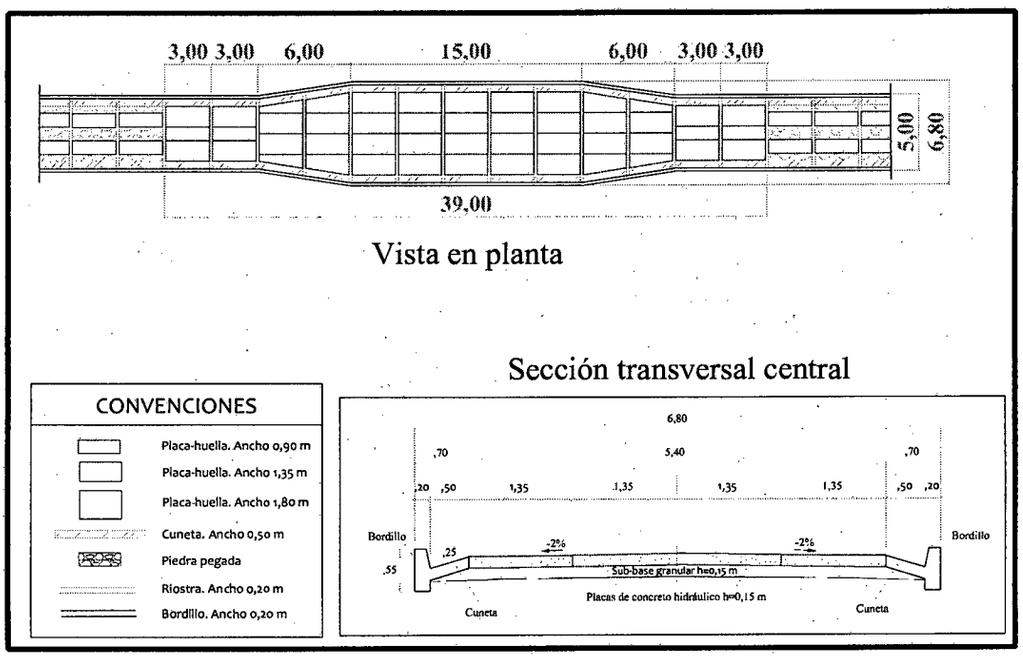


Figura 1.16 ALTERNATIVA UNO. Zona de Cruce

44

0004401 17 OCT 2017

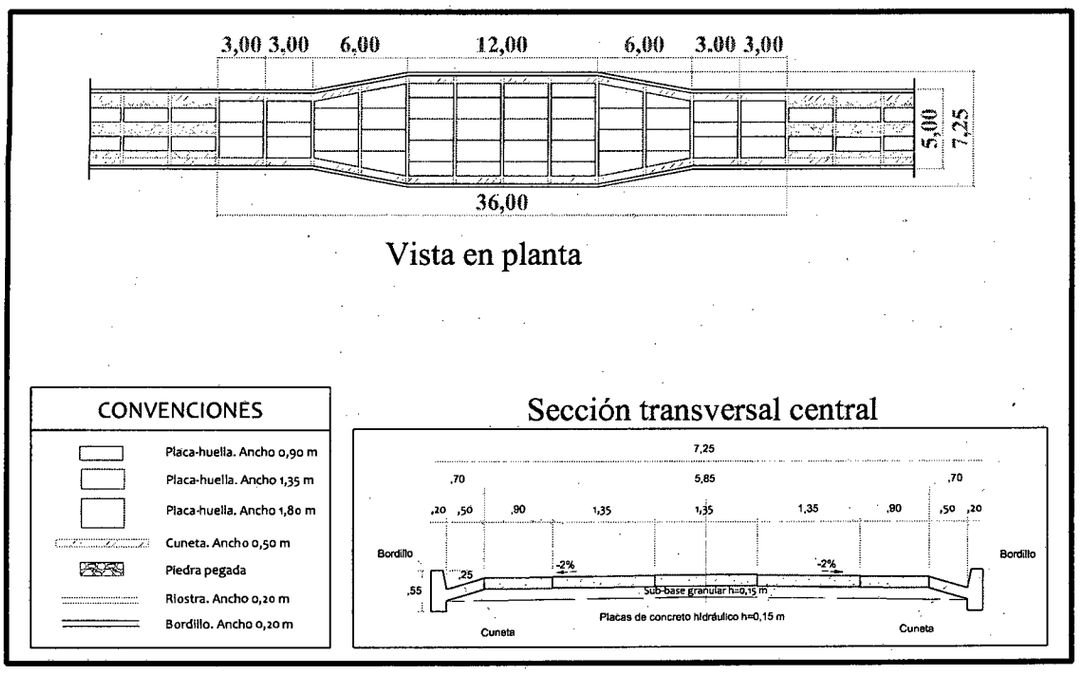


Figura 1.17 ALTERNATIVA DOS. Zona de Cruce

0004401 17 OCT 2017

CAPÍTULO 2

DISEÑO ESTRUCTURAL

46

0004401 17 OCT 2017

CAPÍTULO 2
DISEÑO ESTRUCTURAL

2.1 Enfoque conceptual del diseño estructural

2.1.1 Antecedentes

En el marco de los estudios para la elaboración de la presente Guía se analizó la posibilidad de efectuar el diseño de pavimentos en placa-huella como pavimento rígido convencional, conformado por sucesión de losas de concreto simple de 0.90 metros de ancho y con longitud variable. Los parámetros de este análisis fueron las siguientes:

- Superficie de apoyo de las losas: Subbase granular de quince (15) centímetros de espesor. Se asumieron diferentes valores de Módulo de Reacción del conjunto subrasante-subbase.

- Material de las losas: Concreto simple con módulo de rotura de 38 kg/cm2 (a los veintiocho días).

- Dimensión de las losas:

  - Longitud: Se evaluaron dimensiones de 3.0, 2.5, 2.0, 1.50 y 1.0 m.
  - Ancho: noventa (90) centímetros
  - Espesor: Se evaluaron espesores de entre 0.12 y 0.22 m.

- Sistema de transmisión de cargas: La evaluación se realizó suponiendo transmisión por trabazón de agregados y con pasadores de transferencia de carga.

- Vehículo de diseño: Se analizaron las cargas de los camiones C2 y C3, con ejes simples de rueda simple de 6 toneladas, eje simple de rueda doble de 11 toneladas y eje tándem de 22 toneladas. La carga utilizada fue el peso del semieje sobre una placa-huella. El eje tándem se configuró con una separación de 1.20 m centro a centro entre los dos ejes del tándem.

El cálculo de los esfuerzos y deformaciones se llevó a cabo mediante elementos finitos tridimensionales, colocando la carga sobre la posición que genera el máximo esfuerzo de tensión en el concreto, la cual corresponde a la carga de borde en el centro longitudinal de la placa. Para el caso del eje tándem, la posición más crítica se presentó cuando uno de los ejes del tándem se ubica en el borde en el centro longitudinal de la placa.

0004401 17 OCT 2017

Con base en los resultados de la modelación se decidió evaluar placas-huellas en concreto simple de 0.90 m de ancho y 1.0 m de longitud, dimensiones que permiten controlar los esfuerzos máximos de tensión y el efecto del gradiente de temperatura.

Los detalles del análisis se encuentran en el Anexo 2, documento que contiene el soporte de los resultados del análisis y que se puede consultar al final de la presente Guía.

Las conclusiones generales de la evaluación realizada con placas-huella de 0.90 m de ancho y 1.0 m de longitud se resumen a continuación:

- Con la tipología del tránsito estudiado y un periodo de diseño de 20 años, se encontró que aunque por el criterio de fatiga podría existir la posibilidad de construir placas-huella en concreto simple, no existe suficiente información para poder evaluar el criterio de erosión en este tipo de pavimento. Lo que implica que el comportamiento por erosión seria incierto. Se requiere mayor investigación para desarrollar un modelo válido para evaluar las placas-huella por el criterio de erosión.

- El método de diseño de pavimentos de concreto de la portland cement association (PCA -1984) no es adecuado para determinar espesores de pavimentos en placa-huella, debido a que este utiliza el concepto de esfuerzo equivalente para reducir los esfuerzos máximos de tensión, sobre la base de que solo el 6% de los vehículos circula por el borde de la losa y que a medida de que la carga se aleja del borde los esfuerzos disminuyen, situación que no ocurre en las placas-huella por su geometría angosta. Cuando PCA la desarrolló el método de diseño se modelaron con elementos finitos losas de 3.65 m de ancho y 4.50 m de largo, geometría muy diferente a la placa-huella, que hace que los vehículos circulen muy cerca del borde.

- La geometría de la placa-huella también hace que las presiones en la interface entre la losa y la subbase sean más altas que en las losas modeladas por la PCA, lo que hace que la erosión sea mucho más crítica en la placas-huella y que el modelo de erosión de la PCA deba ser calibrado para su uso en pavimentos de placas-huella. Actualmente no existe información para realizar esa calibración.

Con base en las consideraciones anteriores, se decidió continuar con los pavimentos en placa-huella de concreto reforzado.

2.1.2 Criterio de diseño adoptado

El criterio adoptado es diseñar losas (placas-huella) de quince centímetros (0,15 m) de espesor en concreto reforzado totalmente apoyadas sobre la subbase, complementadas con vigas transversales (riostras) también reforzadas, uniformemente espaciadas y totalmente apoyadas que aportan confinamiento a todos los elementos de la sección transversal. El acero de refuerzo de placa-huellas y riostras se entrecruza para hacer que el conjunto trabaje monolíticamente.

El espesor de placa-huella de 0.15 m se definió porque es el mínimo espesor que permite cumplir con el recubrimiento mínimo del acero en losas que están en contacto con el suelo. Los detalles del cálculo estructural se pueden consultar en el Anexo 3.

48

0004401 17 OCT 2017

Las placas-huella y riostras están diseñadas con capacidad estructural suficiente para que el paso de un camión C-3 con veintidós (22) toneladas en su eje tándem no genere esfuerzos superiores a los esfuerzos admisibles de la placa-huella reforzada. Lo anterior implica que si un camión C-3 no produce falla tampoco lo harían vehículos de menor peso que el del C-3.

2.1.2.1 Incidencia de la intensidad y composición del tránsito

Si ningún vehículo que pueda circular por el pavimento con Placa-huella, de menor peso que el camión C-3, le produce falla a la placa- huella reforzada resulta innecesario efectuar estudios de tránsito (conteos, proyecciones, etc.) tendientes a estimar el volumen de tránsito que podría generar falla en dicho pavimento. La única razón para realizar estudios de tránsito sería establecer si la vía demandaría la circulación de vehículos con dimensiones y peso mayores que los del C-3 durante el periodo de diseño.

En caso de identificarse la necesidad que durante la vida útil del pavimento a construir deban transitar por él vehículos de dimensiones y peso superiores a las del C-3, la construcción del pavimento con Placa-huella reforzada no sería viable bajo las condiciones de la presente Guía.

2.1.2.2 Incidencia del clima

La temperatura y la precipitación son dos variables climáticas que ejercen influencia en el comportamiento de los pavimentos.

La temperatura influye específicamente en las losas de concreto produciendo esfuerzos por alabeo que son consecuencia de gradientes térmicos. Dado que el acero de refuerzo de las placa-huellas absorbe éstos esfuerzos la caracterización de la temperatura en la zona del proyecto es irrelevante.

Al contrario de la temperatura la caracterización de la precipitación es de especial importancia ya que se requiere para el dimensionamiento y localización de las obras de drenaje encargadas de evacuar las aguas lluvias o de cualquier otra índole que puedan acceder a la vía.

En el Capítulo 5 de la presente Guía se consignan las recomendaciones para el diseño del drenaje.

2.1.2.3 Incidencia de la capacidad de soporte de la subrasante

La capacidad de soporte de la subrasante es determinante en la rigidez del conjunto subrasante-subbase siendo éste conjunto el apoyo sobre el que se construyen los elementos estructurales que integran el pavimento como son las placas-huella, las riostras, la piedra pegada, las berma-cunetas y los bordillos.

Como en todos los casos la subbase tiene quince centímetros (0,15 m) de espesor y tanto las características del material como de su proceso constructivo están normalizados por el Instituto Nacional de Vías. La rigidez del conjunto subrasante-subbase depende de la rigidez de la subrasante.

Los diseños estructurales indican que se requiere que la subrasante tenga un valor de CBR mínimo de tres por ciento (3%) para garantizar el debido apoyo al pavimento con Placa-huella. En caso que la

0004401 17OCT2017

subrasante no cumpla con este requisito o se identifique la presencia de suelos expansivos se deberá realizar, con asesoría de un especialista si fuese necesario, el respectivo mejoramiento.

En el Capítulo 4 de la presente Guía se consignan las recomendaciones para caracterizar la subrasante de la vía, entendiendo por caracterización la identificación de las Unidades Homogéneas de Diseño y el valor de CBR representativo en cada una de ellas.

Si la evaluación de la subrasante permite concluir que una Unidad Homogénea de Diseño tiene un valor de CBR representativo igual o superior a tres por ciento (3%) y no hay presencia de suelos expansivos significa que los criterios de diseño consignados en la presente Guía son aplicables para dicha Unidad Homogénea de Diseño.

2.2 Características de la mezcla de concreto

Consecuentemente con lo expuesto en el literal h) del numeral 1.1 del presente documento los parámetros de la mezcla deben ser:

- Resistencia a la compresión a los 28 días f 'c = 210 kg /cm^2.

- Tamaño máximo del agregado grueso Tmáx. = Treinta y ocho milímetros (38 mm).

- Asentamiento = Cinco (5) centímetros.

2.3 Resistencia del acero de refuerzo

El acero se define por su resistencia y se contempla mínimo de fy:

$$4200\ Kg/cm^2 \leq fy \leq 5200\ Kg/cm^2 \quad (CCP\text{-}14).$$

Independiente del diámetro o varilla a usar en los elementos estructurales. Según las barras de refuerzo corrugado deben ser de acero de baja aleación que cumplan con las Normas NTC-2289 – (ASTM A706M). No se permite el uso de acero corrugado de refuerzo fabricado bajo la norma NTC 245, ni aceros trabajados en frio o trefilado. Seguir lo indicado en el capítulo C-7 de la Norma NSR-2010.

Cuando sea necesaria ductilidad o soldadura, deben especificarse aceros que cumplan con las exigencias de la norma ASTM A 706 "Low Alloy Steel Deformed Bars for Concrete Reinforcement".

El módulo de Elasticidad del acero se define Es=200.000 Mpa

0004401 17 OCT 2017

2.4 Placa-huella en concreto reforzado

La metodología de diseño consistió en aplicar el Modelo de Elementos Finitos (FEM) para calcular los esfuerzos y deformaciones que se presentarían debido a la aplicación de las cargas vivas y muertas, tanto mayoradas como sin mayorar, en función de las exigencias de los códigos NSR-2010 y CCP-14, con los resultados obtenidos asociados a momentos, (M), cortantes (V), cargas (P), sea en placas o elementos viga o Beam (Frame), se procede a aplicar la Teoría de Resistencia I propuesta en el CCP-14, incluyendo la metodología de cálculo expuesta en dicho código para el diseño a momento y cortante.

La memoria de cálculo del estudio está consignada en el documento denominado **MEMORIA DE CÁLCULO ESTRUCTURAL DE LOS ELEMENTOS QUE INTEGRAN EL PAVIMENTO CON PLACA-HUELLA.**

2.4.1 Dimensiones y refuerzo.

El diseño de la Placa huella reforzada conforme los resultados mostrados en el Anexo 3, establecen que los efectos derivados de la disminución de la longitud de la placa, mejores condiciones de apoyo o mayor ancho de la huella permiten una leve disminución de los esfuerzos en los elementos, que mejoran las condiciones de seguridad pero no ameritan el cambio del refuerzo de la misma. Por lo anterior la placa-huella tendrá las siguientes características:

Longitud:
La longitud puede fluctuar entre un valor mínimo de un metro (1,00 m) y un valor máximo de dos metros con ochenta centímetros (2,80 m).

Ancho:
Las placas-huella pueden ser de tres anchos:

- Noventa centímetros (0,90 m).
- Un metro con treinta y cinco centímetros (1,35 m).
- Un metro con ochenta centímetros (1,80 m).

Espesor:
Quince centímetros (0,15 m). El espesor es igual para todos los tamaños de placa-huella.

Refuerzo longitudinal:
Una varilla número 4 cada quince centímetros (1#4@0,15).

Refuerzo transversal:
Una varilla número 2 cada treinta centímetros (1#2@0,30).

La longitud de traslape de las varillas longitudinales #4 es de mínimo sesenta (60 cms) centímetros.

Con referencia al refuerzo requerido por las placas-huellas es pertinente manifestar:

- Los mayores esfuerzos se presentan en la placa-huella de dos metros con ochenta centímetros (2,80 m) de longitud y noventa centímetros de ancho (0,90 m). A medida que la longitud disminuye o el ancho aumenta los esfuerzos tienden a ser menores. Sin embargo la disminución de los

0004401 17 OCT 2017

esfuerzos, y por consiguiente del requerimiento de refuerzo , no es lo suficientemente sensible como para justificar, desde los puntos de vista constructivo y económico, proponer diseños diferenciales.

- El refuerzo arriba indicado es el resultado del análisis estructural del caso crítico y por lo expuesto en el párrafo anterior también se debe usar para todas las placas-huella independientemente de su forma y dimensiones. Se menciona la forma porque en las curvas horizontales resultan placas-huella ligeramente trapezoidales debido a que las riostras no son totalmente paralelas y a que en la transición del sobreancho también algunas placa-huellas tienen forma trapezoidal.

2.4.2 Esquema en planta, perfil y detalles

El acero de refuerzo se debe colocar en la mitad del espesor de la placa-huella , lo que implica un recubrimiento de siete y medio centímetros (0,075 m) tanto en la cara superior como en la inferior.

Colocar el acero en la mitad del espesor parece improcedente ya que allí está el eje neutro. Sin embargo los cálculo estructurales de la placa-huella, en la presente Guía, parten de que el acero está en el centro del espesor, posición que es beneficiosa ya que ésta única parrilla de refuerzo sirve para absorber esfuerzos tanto positivos como negativos que se producen por el desplazamiento de las cargas móviles. Además, permite cumplir con el recubrimiento mínimo establecido por el Código.

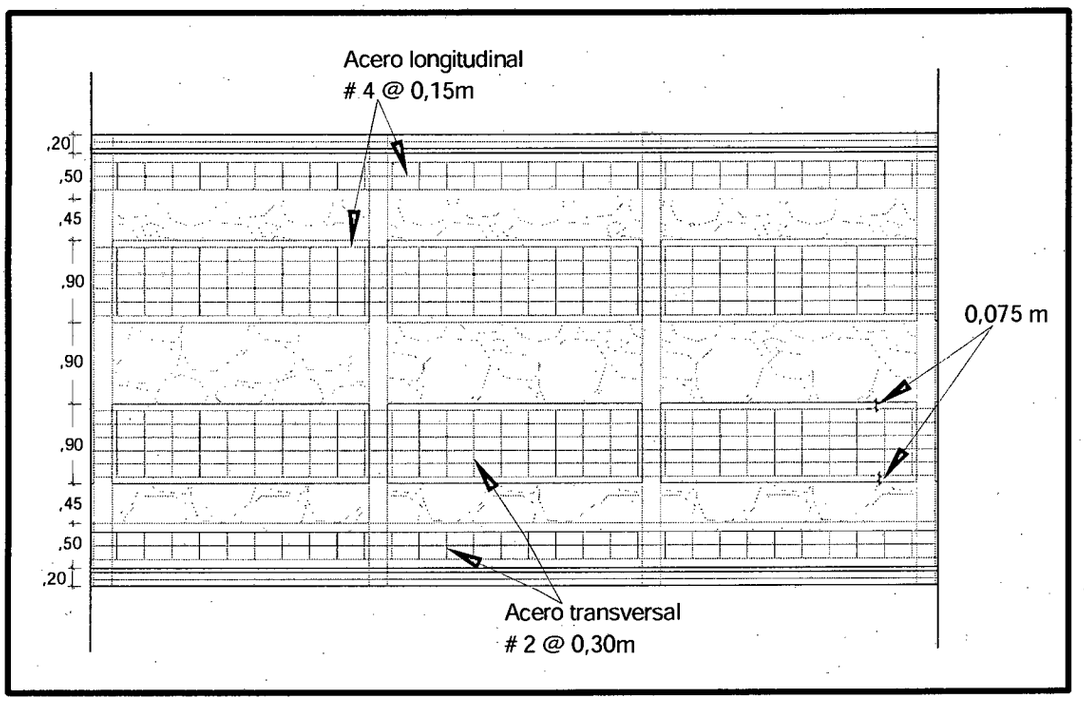


Figura 2.1 Planta de Distribución del refuerzo

0004401 17 OCT 2017

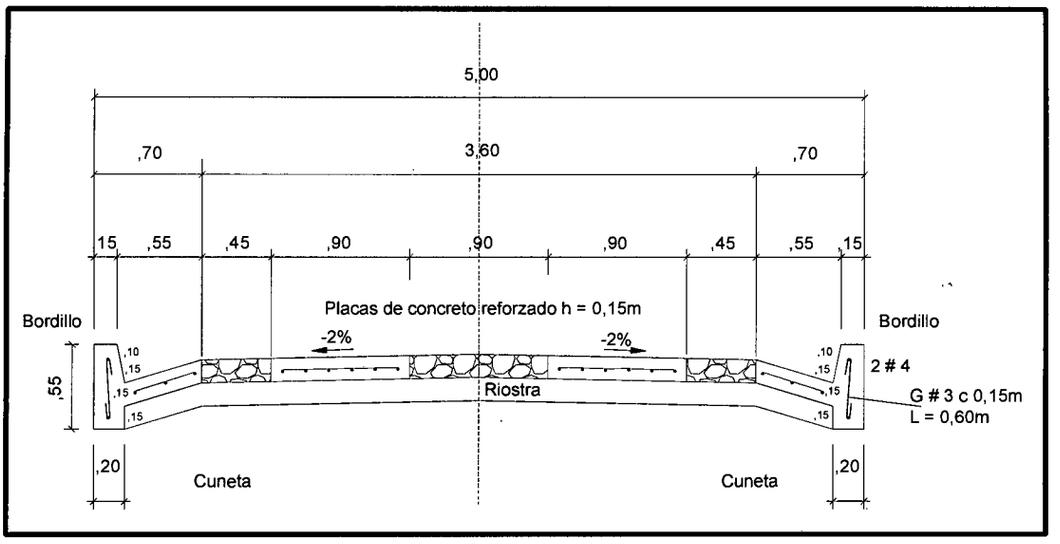


Figura 2.2 Corte Transversal

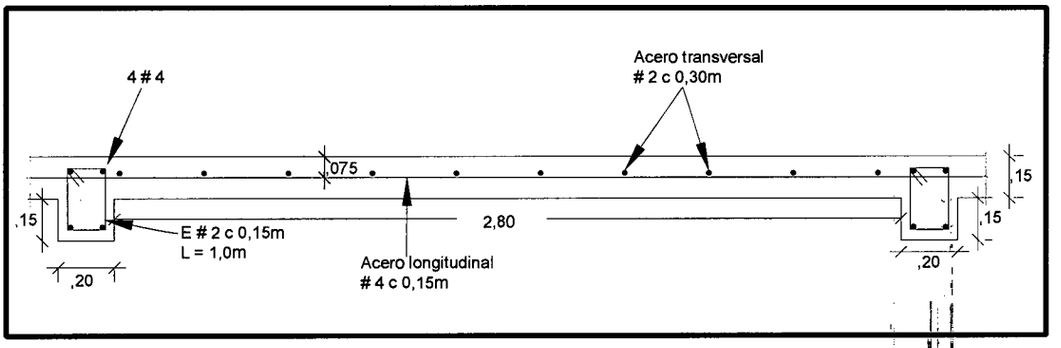


Figura 2.3 Corte Longitudinal

2.4.3 Textura superficial de la Placa-huella

La superficie de la Placa-huella debe tener una textura transversal homogénea en forma de estriado, que cumpla con lo indicado en el numeral 500.4.15 del Artículo 500 de las especificaciones INVIAS-2013.

2.5 Riostra

2.5.1 Dimensiones y refuerzo

El modelo de Elementos Finitos desarrollado también permitió determinar los esfuerzos y deformaciones generados en la riostra a partir de los cuales se elaboro el diseño estructural de este elemento el cual tiene las siguientes características:

Longitud máxima: 6,80 metros.

Ancho de la Riostra: 0,20 metros.

0004401 17OCT2017

Peralte de la Riostra:
0,30 metros.

Refuerzo Longitudinal:
Cuatro varillas número 4 (4#4).

Estribos:
Una varilla número 2 cada 15 centímetros (1#2@0,15).

La longitud de traslape de las varillas longitudinales #4 es de mínimo sesenta (60,0 cms) centímetros.

El recubrimiento de las varillas longitudinales #4 es de siete coma cinco (0,075 m) centímetros en la parte inferior y de cuatro (0,04 m) centímetros en la parte superior.

2.5.2 Esquema en planta, perfil y detalles

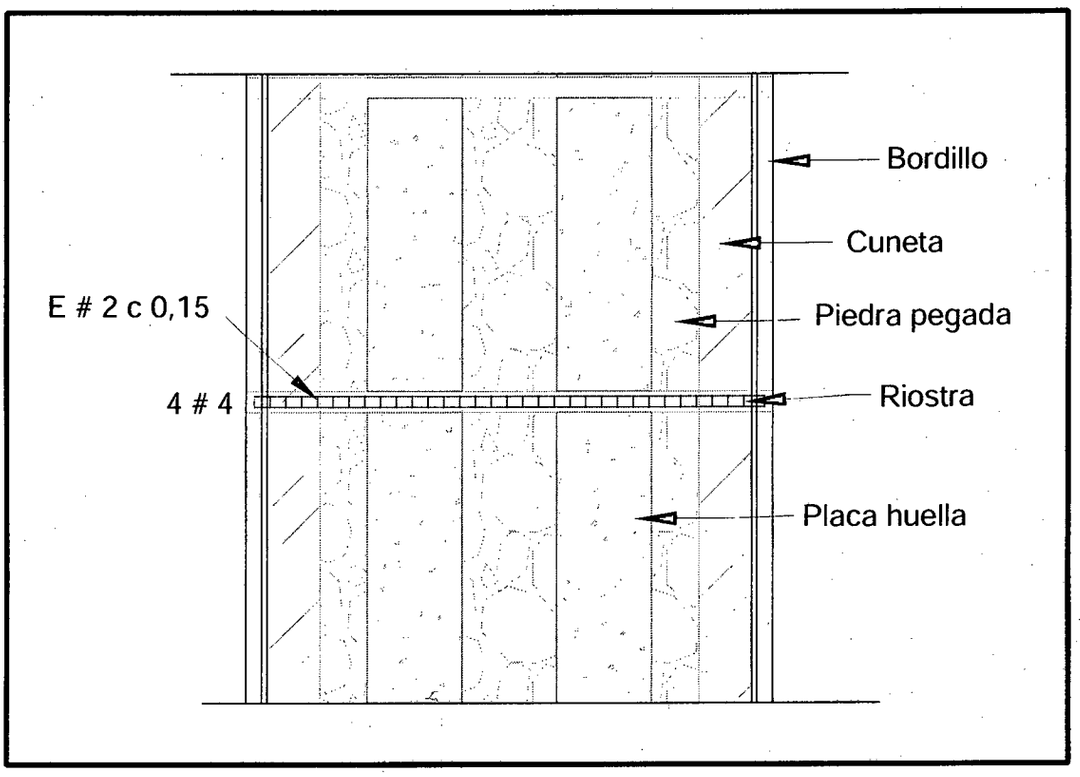


Figura 2.4 Planta

0004401 170C:2017 54

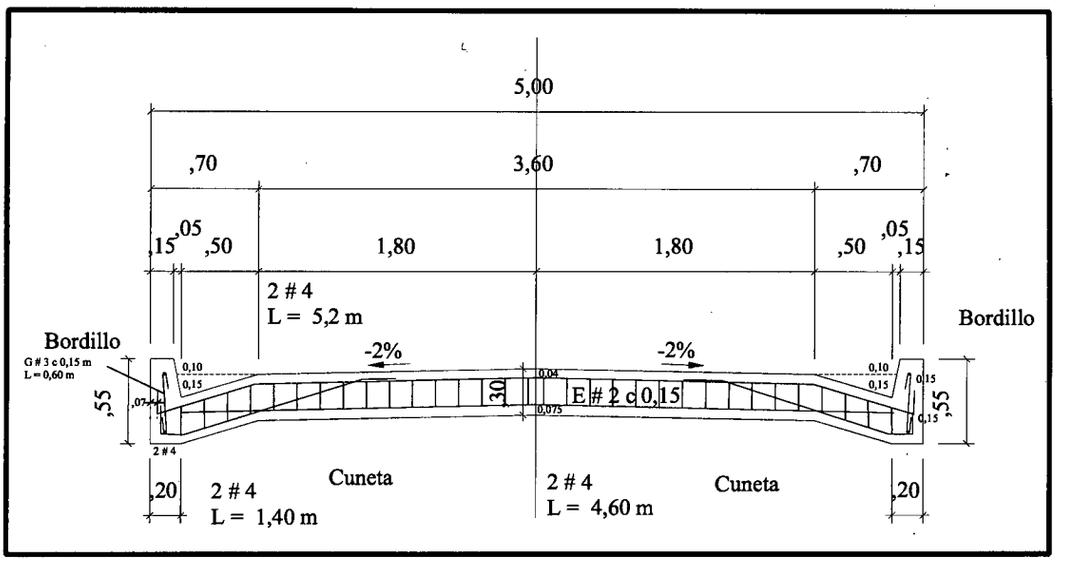


Figura 2.5 Corte Longitudinal

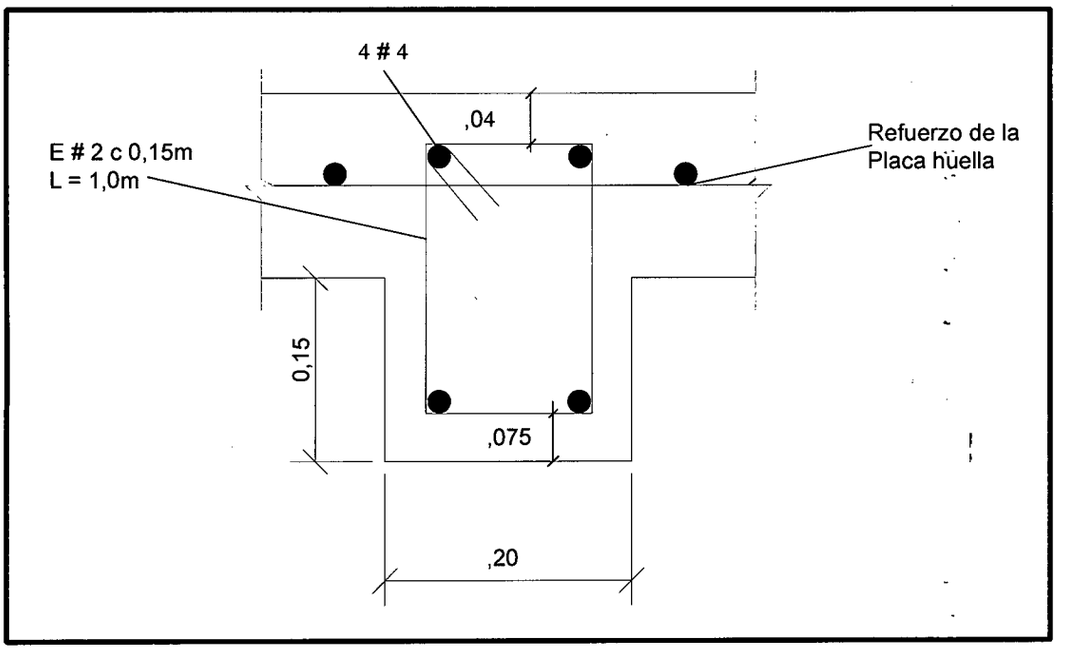


Figura 2.6 Corte Transversal Sección en Placa huella

0004401 17OCT2017

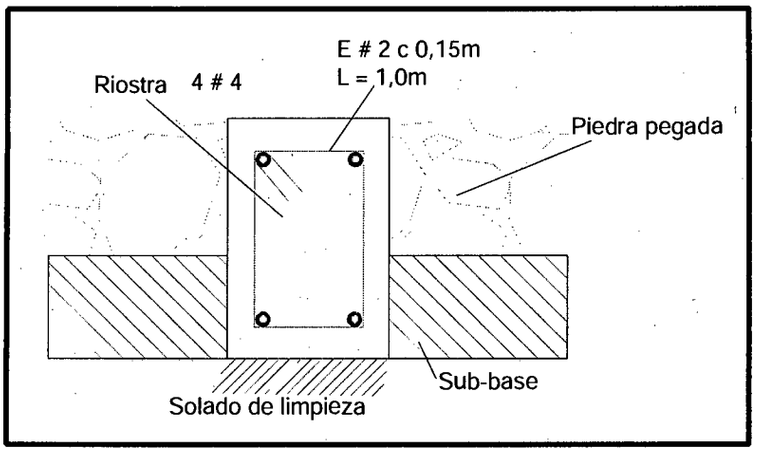


Figura 2.7 Corte Transversal Sección en Piedra Pegada

2.6 Juntas

El modelo concibió los diferentes elementos estructurales del pavimento en Placa-huella como una estructura monolítica, por ende el proceso constructivo debe garantizar la adecuada transmisión de los esfuerzos y deformaciones a lo largo y ancho de estos elementos, a fin de garantizar esto, a continuación se muestran los detalles de las diferentes juntas de construcción.

2.6.1 Junta transversal de construcción

2.6.1.1 Junta Transversal de Construcción de la Placa-huella

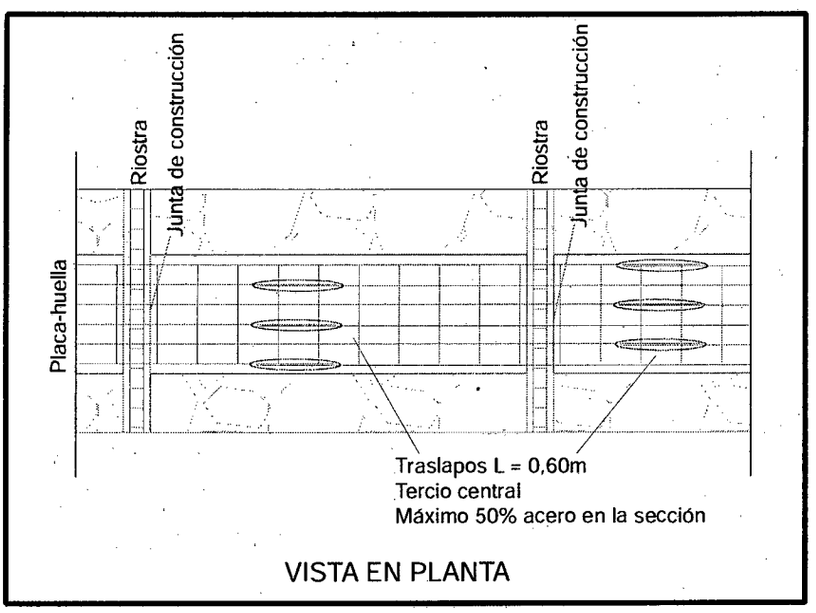


Figura 2.8 Junta transversal de construcción en la Placa-huella

0004401 17OCT2017

2.6.1.2 Junta Transversal de Construcción de la Berma - cuneta

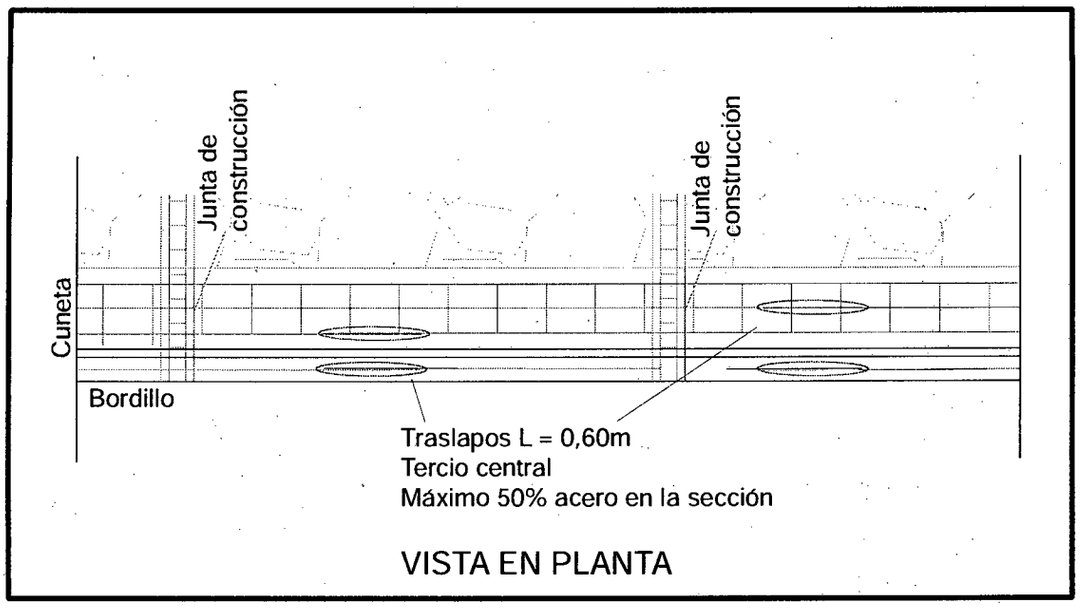


Figura 2.9 Junta Transversal de Construcción en la Berma-cuneta

2.6.1.3 Junta Transversal de Construcción de la Riostra

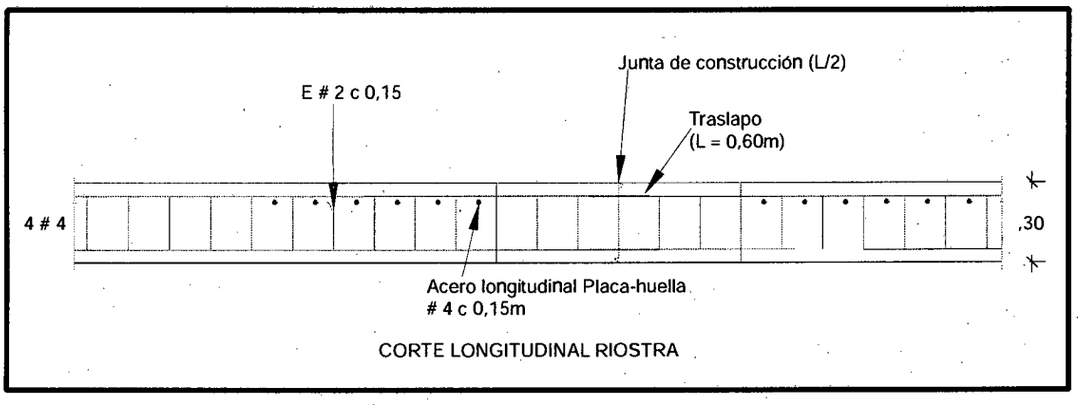


Figura 2.10 Junta transversal de construcción en la Riostra

0004401 17OCT2017

2.6.2 Junta longitudinal de construcción

2.6.2.1 Junta entre Placa-huella, Riostra o Berma Cuneta y la Piedra Pegada

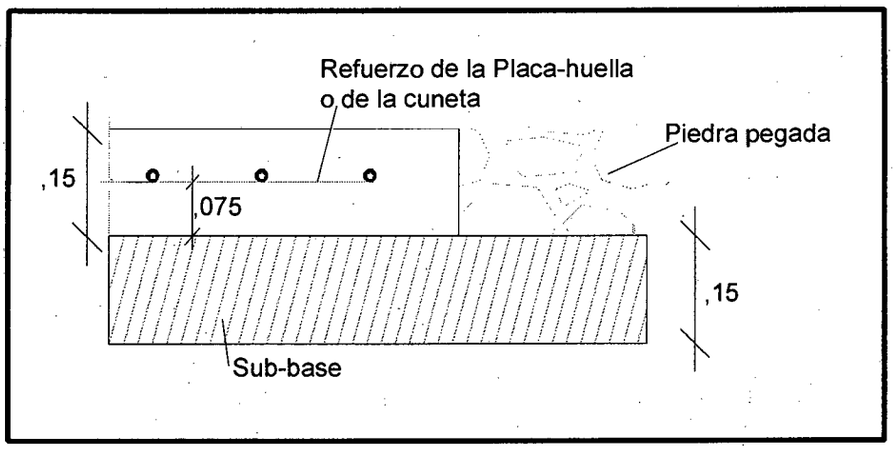


Figura 2.11 Junta longitudinal entre Placa-huella o Berma-cuneta y la Piedra pegada

2.7 Piedra Pegada

La principal función de la piedra pegada es la disminución de costos en la construcción de pavimentos con placa-huella reforzada, por ende ésta no tiene capacidad estructural y por lo tanto no requiere mecanismo de transmisión de esfuerzos con los otros elementos del pavimento con placa-huella.

2.7.1 Características de los materiales

La piedra pegada conformada por un concreto ciclópeo, compuesto por 60% de concreto simple y 40% de agregado ciclópeo, con las siguientes características:

Características del concreto simple:

- Resistencia a la compresión a los 28 días f 'c = 210 kg/cm².
- Tamaño máximo del agregado grueso Tmáx. = Treinta y ocho (38 mm) milímetros.
- Asentamiento = Cinco (5) centímetros.

Características del Agregado Ciclópeo:

- Tamaño máximo del agregado Tmáx. = entre ocho (0,08 m) y doce (0,12 m) centímetros.
- Deben ser cantos rodados.

Las demás características de los materiales deben cumplir con la Especificación 630 – 13 del Instituto Nacional de Vías.

2.7.2 Colocación de la piedra pegada

La piedra pegada deberá colocarse sobre la subbase granular una vez se encuentre fundida y fraguada la placa-huella, la riostra y la berma-cuneta circundante.

0004401 17OCT2017

Se colocará una capa de concreto simple de cinco centímetros (0,05 m) de espesor directamente sobre la subbase para luego colocar manualmente el agregado ciclópeo distribuyéndolo uniformemente. A continuación se colocará el resto del concreto simple y finalmente se deberá completar el agregado ciclópeo. En todo caso se deberá cumplir con la relación de 60% de concreto simple y 40% de agregado ciclópeo y buscar siempre que la capa quede lo más uniforme posible.

2.8 Diseño estructural de la Berma-cuneta y el Bordillo

Aunque la solicitación sea eventual la berma-cuneta debe poder soportar los esfuerzos producidos por el vehículo de diseño y, por ende, el espesor, el refuerzo requerido y las características de los materiales deben ser similares a los utilizados en la placa-huella. La berma-cuneta tiene adosado el bordillo de confinamiento por lo que su geometría es sustancialmente diferente a la de la placa-huella. A continuación se presentan los detalles de la berma-cuneta y el bordillo.

2.8.1 Esquema en planta, perfil y detalles

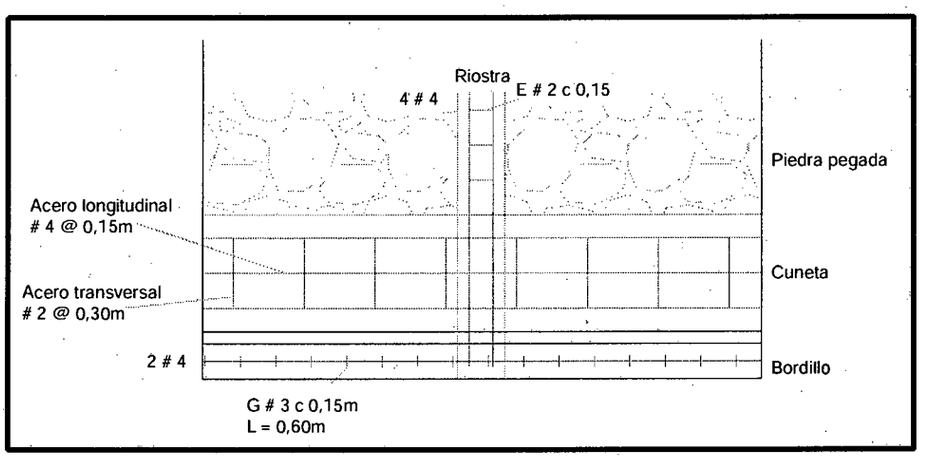


Figura 2.12 Planta

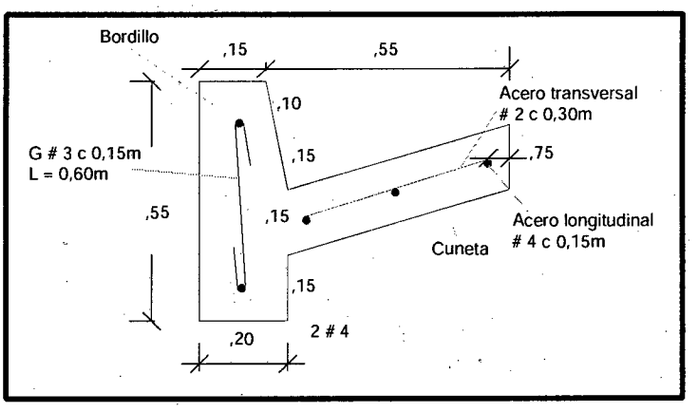


Figura 2.13 Corte Berma-cuneta Sección en la Cuneta

0004401 17OCT2017

CAPÍTULO 3

RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO GEOMÉTRICO DE LA VÍA

0004401 17OCT2017

CAPÍTULO 3
RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO GEOMÉTRICO DE LA VÍA

3.1 Metodología sugerida para la elaboración del diseño geométrico de la vía

El primer conjunto de actividades a llevar a cabo para la ejecución del proyecto corresponde a la elaboración del diseño geométrico de la vía a pavimentar con Placa-huella. Respecto a este diseño es pertinente anotar lo siguiente:

- El diseño no debe cambiar la geometría de la vía existente. Las únicas modificaciones serían pequeños ajustes a la rasante para obtener un perfil longitudinal lo más uniforme posible y las ampliaciones de la banca hacia el interior de las curvas horizontales que requieran sobreancho. Eventualmente sería necesario suplementar transversalmente la banca en aquellos sectores en donde la vía existente no alcance a tener el mínimo de cinco (5,0) metros de ancho.

- Uno de los objetivos que se pretende con la elaboración del diseño geométrico es contar con un sistema de referencia que permita la correcta construcción de la obra. Este sistema de referencia es el abscisado materializado con estacas a lo largo de la vía.

- Dado que no se realizarían rectificaciones geométricas importantes no aplicaría el Manual de DiseñoGeométrico de Carreteras del INVIAS.

A continuación se sugiere una secuencia metodológica para la elaboración del diseño geométrico de la vía. Los pasos serían los siguientes.

1. Realizar el levantamiento topográfico de la vía existente

a) Efectuar un recorrido a pie del tramo a pavimentar con el propósito de identificar estratégicamente los Puntos de Estación que constituyen los vértices de la Línea de Base.

b) Materializar con mojones de concreto los Puntos de Estación.

c) Establecer la Norte y asignar las coordenadas Norte, Este y Cota del Punto de Estación Uno (PE1). Lo ideal es poder realizar el levantamiento topográfico refiriéndolo al sistema Magna-Sirgas.

d) Identificar, utilizando jalones y EN FORMA APROXIMADA, el punto sobre el eje de la vía donde

62

0004401 17OCT2017

parece estar la posición del PC y el PT de cada curva. Lo anterior define las tangentes y las curvas.

e) Trazar la trayectoria del eje aproximado de la vía utilizando marcas provisionales que permanecerían solo mientras dure el levantamiento topográfico. Tales marcas pueden ser piedras de mediano tamaño, del orden de quince centímetros, o estacas si es posible.

En las tangentes las marcas se deben colocar espaciadas diez metros aproximadamente (10 m) y alineadas utilizando el jalón del PT anterior y el jalón del PC siguiente.

En las curvas el ingeniero (o el topógrafo) se debe imaginar que el eje de la vía sigue la trayectoria de un polígono de cinco metros (5 m) de lado y colocar marcas en sus vértices. Si al observar la curva se considera que es lo suficientemente amplia como para que la calzada no requiera sobreancho el polígono puede ser de diez metros (10 m) de lado.

f) Leer con la Estación Total las coordenadas de puntos de la sección transversal en cada marca, así:

Las coordenadas del punto donde está la marca. Dichas coordenadas corresponden al eje aproximado de la vía existente en dicha sección transversal. Esta lectura y su correspondiente en todas las demás secciones transversales se deben constituir como una línea de quiebre en el modelo digital para obtener así la trayectoria aproximada del eje.

Las coordenadas del pie de los taludes. Estas lecturas y su correspondiente en todas las demás secciones transversales se deben constituir como líneas de quiebre en el modelo digital para obtener así la trayectoria aproximada de los bordes de la vía existente.

Las coordenadas de la corona de los taludes. Estas lecturas y su correspondiente en todas las demás secciones transversales se deben constituir como líneas de quiebre en el modelo digital para obtener así la trayectoria aproximada de la línea de chaflanes.

Las coordenadas de puntos localizados a cinco metros (5 m) hacia afuera de la corona de los taludes. Estas lecturas y su correspondiente en todas las demás secciones transversales se deben constituir como líneas de quiebre en el modelo digital.

g) Dibujar el plano de la vía existente en el que aparece la trayectoria aproximada del eje, la corona y las líneas de chaflán. En el Plano No. 1, anexo a este documento, se presenta el ejemplo de un levantamiento topográfico.

2. Elaborar el diseño en planta del eje de la vía

Sobre el modelo digital del levantamiento de la vía existente (Plano No. 1) y utilizando el software apropiado se debe diseñar el eje en planta.

62

0004401 17OCT2017

Para el diseño se debe:

- Tratar de diseñar el eje superponiéndolo, hasta donde sea posible, a la trayectoria aproximada del eje de la vía existente.

- Efectuar tanteos hasta encontrar la curva circular que mejor se ajuste al polígono que representa el eje aproximado de la vía existente. Una vez encontrada la curva adecuada quedará identificada la posición exacta del PC y del PT la cual variará ligeramente, como es obvio, de la posición en la que se colocaron los jalones al momento de iniciar el levantamiento topográfico.

- La posición del eje tendría eventuales ajustes dependiendo del requerimiento de sobreancho que presenten las curvas. Los ajustes deberán minimizar los pequeños cajeos o rellenos que se puedan necesitar para alojar dichos sobreanchos.

- Una vez definido el eje en planta se contará con el abscisado indispensable para la correcta construcción de la obra. El software de diseño debe calcular el Listado de Coordenadas del Eje para localizarlo con la Estación Total.

3. Localizar sobre la vía el eje en planta proyectado
A partir de la Línea de Base se deberá materializar el eje utilizando estacas u otro elemento adecuado.

4. Nivelar el eje y dos líneas paralelas espaciadas dos metros con cincuenta centímetros (2,50 m) a cada lado del eje. Estas líneas auxiliares corresponden a la cara exterior de los bordillos de las Berma-cunetas, es decir, están separadas el ancho de la corona en tangente de la vía ya pavimentada que es de cinco metros (5,0 m).

La nivelación se debe realizar con nivel de precisión y tomar como BM la cota asignada al Punto de Estación 1.

5. Elaborar el diseño en perfil del eje de la vía
Teniendo como referencia los perfiles longitudinales sobre la superficie existente de la vía, tanto a lo largo del eje proyectado como de los bordes de la corona una vez esté construido el pavimento, se debe diseñar la rasante en el eje.

Para el diseño se debe tener en cuenta lo siguiente:

- La rasante se debe diseñar POR ENCIMA DE LA SUPERFICIE EXISTENTE dejando espacio para la subbase de quince centímetros (0,15 m) de espesor y las placa-huellas de diecisiete centímetros (0,17 m) de espesor. Lo anterior porque, como ya se indicó en párrafos anteriores, el criterio principal es no alterar la superficie existente en afirmado, superficie que se encuentra ya consolidada.

- El espesor mínimo de la subbase en todos los puntos de la sección transversal es de quince centímetros (0,15 m). En tangente se debe tener en cuenta el bombeo de menos dos por ciento

63

0004401 17OCT2017

(-2%) lo que se traduce en que el espesor en el eje sea un poco mayor a quince centímetros.

- En todas las curvas horizontales el peralte es de dos por ciento (2%). Como ya se conoce la deflexión y el *radio* de curvatura se puede saber si la curva requiere sobreancho y cuál es su *valor.* La información anterior es relevante para definir la cota de la rasante en el eje de tal manera que en ningún punto de la sección transversal el espesor de la subbase sea inferior a quince centímetros.

- También, como ya se ha manifestado, el diseño de la rasante debe corregir pequeñas concavidades que eventualmente pueda tener el perfil de la superficie existente. Dicha corrección se debe hacer con rellenos muy localizados y de poca magnitud.

- El análisis del perfil de las secciones transversales existentes, obtenido con el modelo digital del levantamiento topográfico, también debe tomarse en cuenta para el diseño en perfil de la rasante en el eje.

6. Dibujar los planos Planta-Perfil

En los planos Planta-Perfil se deberá consignar la siguiente información:

- La vista en planta del eje de la vía y los bordes de la corona, siendo dichos bordes la traza de la cara exterior del bordillo de las Bermas-cuneta. En las curvas con sobreancho se deberá apreciar la sección ampliada desde el inicio de la transición de dicho sobreancho desde antes del PC hasta el final de la transición después del PT. Además, deberá aparecer el PI de cada curva, el abscisado del eje cada cincuenta o cien metros y la abscisa de todos los PC y PT. También deberán aparecer el Cuadro de Elementos de Curva y el Cuadro de Coordenadas de la Línea de Base, o deltas materializados en el terreno.

- El perfil de la superficie existente a lo largo del eje en planta proyectado.

- El perfil del eje proyectado que es la Rasante en el Eje.

- Deberá aparecer la abscisa del PCV, PIV y PTV de cada una de las curvas verticales así como la pendiente de todas las tangentes verticales. También la abscisa de las alcantarillas.

- El diagrama de peraltes.

7. Dibujar la modulación de placa-huella en cada uno de los elementos que integran la planta de la vía.

- Modulación en tangente, siguiendo las pautas consignadas en la Figura 1.2 de esta Guía.

- Modulación en cada una de las curvas horizontales del Proyecto, siguiendo las pautas consignadas en las Figuras 1.3 a 1.14 de esta Guía.

- Modulación de cada una de las Zonas de Cruce del Proyecto siguiendo las pautas consignadas en las

0004401 17OCT2017

Figuras 1.15 y 1.16 de esta Guía.

En el Plano No. 2, anexo a este documento se muestra un ejemplo de planos Planta-Perfil. Se recomienda que la escala de los planos impresos sea como mínimo 1:500H y 1:50V, para que puedan visualizarse los detalles representados.

8. Elaborar la Cartera de Coordenadas de la Línea de Base
En la Tabla 3.1 se puede observar un ejemplo.

9. Cartera de Localización
La Tabla 3.2 muestra un ejemplo de la Cartera de Localización del Eje en Planta.

10. Cartera de Rasante
Un ejemplo de la Cartera de Rasante se presenta en la Tabla 3.3.

COORDENADAS DE LA LÍNEA DE BASE (m)			
DELTA	N	E	COTA
107	788245,813	1´081.604,855	2979,239
108	788374,789	1´081.585,456	2987,323
109	788458,188	1´081.546,477	2993,741
110	788497,181	1´081.459,590	3001,742
111	788578,806	1´081.521,155	3006,000
112	788643,048	1´081.557,825	3004,426
113	788814,993	1´081.649,893	2995,548
114	788987,894	1´081677,355	2985,721

Tabla 3.1 Ejemplo de Cartera de Coordenadas de la Línea de Base

CARTERA DE COORDENADAS DEL EJE				
Punto	Abscisa	Coordenadas (m)		
		N	E	Cota
INICIO	0	788392.319	1081575.750	2989.257
	10	788401.507	1081571.802	2989.822
	20	788410.695	1081567.854	2990.364
	30	788419.882	1081563.905	2991.227
	40	788429.070	1081559.957	2991.363
	50	788438.257	1081556.009	2991.884
PC	58.337	788445.917	1081552.717	2992.461
	60	788447.426	1081552.018	2992.610
	70	788455.481	1081546.171	2993.338
	80	788461.179	1081538.009	2993.590

Tabla 3.2 Ejemplo de Cartera de Localización del Eje

65

0004401 17OCT2017

CARTERA DE COORDENADAS DEL EJE				
Punto	Abscisa	Coordenadas (m)		
		N	E	Cota
PT	81.9	788461.938	1081536.268	2993.640
	90	788464.938	1081528.744	2994.115
	100	788468.643	1081519.455	2994.896
	110	788472.347	1081510.167	2995.700
	120	788476.052	1081500.878	2996.455
	130	788479.757	1081491.590	2997.128
PC	139.022	788483.099	1081483.210	2997.718
	140	788483.480	1081482.309	2997.766
	150	788489.401	1081474.348	2998.465
	160	788498.123	1081469.621	2999.271
	170	788508.026	1081469.008	3000.106
	180	788517.265	1081472.623	3001.197
PT	181.1	788518.164	1081473.257	3001.320
	190	788525.312	1081478.559	3002.315
	200	788533.344	1081484.517	3003.133
	210	788541.376	1081490.474	3003.794
	220	788549.408	1081496.431	3004.401
	230	788557.439	1081502.389	3004.879
	240	788565.471	1081508.346	3005.234
	250	788573.503	1081514.304	3005.289
	260	788581.534	1081520.261	3005.427
	270	788589.566	1081526.219	3004.851
	280	788597.598	1081532.176	3004.379
PC	286.657	788602.945	1081536.142	3004.079
	290	788605.670	1081538.077	3003.900
	300	788614.273	1081543.163	3003.403
	310	788623.443	1081547.136	3002.958
	320	788633.036	1081549.936	3002.805
PT	329.56	788642.465	1081551.473	3002.747
	330	788642.904	1081551.518	3002.742
	340	788652.852	1081552.535	3002.369
	350	788662.800	1081553.553	3001.912
	360	788672.748	1081554.570	3001.344
PC	362.149	788674.886	1081554.789	3001.216
	370	788682.613	1081556.141	3000.719
	380	788692.042	1081559.430	2999.737
	390	788700.721	1081564.369	2999.490

Continuación **Tabla 3.2**

0004401 17OCT2017

CARTERA DE COORDENADAS DEL EJE				
Punto	Abscisa	Coordenadas (m)		
		N	E	Cota
	400	788708.364	1081570.796	2998.566
PT	404.673	788711.508	1081574.252	2998.166
	410	788714.922	1081578.341	2997.774
	420	788721.332	1081586.017	2997.066
	430	788727.741	1081593.693	2996.423
	440	788734.150	1081601.368	2995.808
PC	440.163	788734.255	1081601.494	2995.798
	450	788741.036	1081608.610	2995.272
	460	788748.823	1081614.872	2994.818
	470	788757.374	1081620.043	2994.541
PT	477.296	788764.007	1081623.074	2994.283
	480	788766.519	1081624.077	2994.230
	490	788775.805	1081627.786	2994.087
	500	788785.092	1081631.494	2993.812
	510	788794.379	1081635.203	2993.733
	520	788803.666	1081638.912	2993.411
	530	788812.952	1081642.621	2993.088
FIN	534.649	788817.270	1081644.346	2992.997

Continuación **Tabla 3.2**

Abscisa	Coordenadas borde izquierdo (N,E,Cota)	Peralte izq. %	Coordenadas eje (N,E)	Cota rasante (m)	Peralte der. %	Coordenadas borde derecho (N,E,Cota)
0	788391.609,1081574.096,2989.221	-2	788392.319,1081575.750	2989.257	-2	788393.030,1081577.404,2989.221
10	788400.796,1081570.148,2989.997	-2	788401.507,1081571.802	2990.033	-2	788402.218,1081573.456,2989.997
20	788409.628,1081565.373,2990.622	-2	788410.695,1081567.854	2990.676	-2	788411.761,1081570.334,2990.622
30	788418.816,1081561.425,2991.132	-2	788419.882,1081563.905	2991.186	-2	788420.948,1081566.386,2991.132
40	788428.300,1081558.165,2991.605	-2	788429.070,1081559.957	2991.644	-2	788429.840,1081561.749,2991.605
50	788437.546,1081554.355,2992.108	-2	788438.257,1081556.009	2992.144	-2	788438.968,1081557.663,2992.108
PC1 58.337	788445.029,1081550.650,2992.735	-2	788445.917,1081552.717	2992.78	2	788446.628,1081554.371,2992.816
60	788446.424,1081550.004,2992.897	-2	788447.426,1081552.018	2992.942	2	788448.227,1081553.630,2992.978
70	788453.875,1081544.594,2993.573	-2	788455.481,1081546.171	2993.618	2	788456.765,1081547.432,2993.654
80	788459.146,1081537.045,2993.839	-2	788461.179,1081538.009	2993.884	2	788462.805,1081538.780,2993.920
PT1 81.900	788459.848,1081535.434,2993.915	-2	788461.938,1081536.268	2993.96	2	788463.610,1081536.935,2993.996
90	788463.267,1081528.077,2994.397	-2	788464.938,1081528.744	2994.433	-2	788466.610,1081529.411,2994.397
100	788466.971,1081518.789,2995.184	-2	788468.643,1081519.455	2995.22	-2	788470.315,1081520.122,2995.184

Tabla 3.3 Ejemplo de Cartera de Rasante

67

0004401 17OCT2017

Abscisa	Coordenadas borde izquierdo (N,E,Cota)	Peralte izq. %	Coordenadas eje (N,E)	Cota rasante (m)	Peralte der. %	Coordenadas borde derecho (N,E,Cota)
110	788470.676,1081509.500,2995.988	-2	788472.347,1081510.167	2996.024	-2	788474.019,1081510.834,2995.988
120	788474.380,1081500.212,2996.741	-2	788476.052,1081500.878	2996.777	-2	788477.724,1081501.545,2996.741
130	788478.085,1081490.923,2997.428	-2	788479.757,1081491.590	2997.464	-2	788481.428,1081492.257,2997.428
PC2 139.022	788481.427,1081482.543,2998.084	2	788483.099,1081483.210	2998.048	-2	788485.607,1081484.210,2997.994
140	788481.838,1081481.572,2998.147	2	788483.480,1081482.309	2998.111	-2	788485.943,1081483.415,2998.057
150	788488.222,1081472.988,2998.796	2	788489.401,1081474.348	2998.76	-2	788491.169,1081476.388,2998.706
160	788497.627,1081467.891,2999.559	2	788498.123,1081469.621	2999.523	-2	788498.868,1081472.216,2999.469
170	788508.305,1081467.230,3000.518	2	788508.026,1081469.008	3000.482	-2	788507.608,1081471.675,3000.428
180	788518.267,1081471.128,3001.616	2	788517.265,1081472.623	3001.58	-2	788515.762,1081474.866,3001.526
PT2 181.100	788519.237,1081471.811,3001.732	2	788518.164,1081473.257	3001.696	-2	788516.556,1081475.426,3001.642
190	788526.385,1081477.113,3002.524	-2	788525.312,1081478.559	3002.56	-2	788524.240,1081480.005,3002.524
200	788534.416,1081483.071,3003.335	-2	788533.344,1081484.517	3003.371	-2	788532.272,1081485.962,3003.335
210	788542.448,1081489.028,3004.045	-2	788541.376,1081490.474	3004.081	-2	788540.303,1081491.920,3004.045
220	788550.480,1081494.986,3004.706	-2	788549.408,1081496.431	3004.742	-2	788548.335,1081497.877,3004.706
230	788558.512,1081500.943,3005.178	-2	788557.439,1081502.389	3005.214	-2	788556.367,1081503.835,3005.178
240	788566.543,1081506.901,3005.455	-2	788565.471,1081508.346	3005.491	-2	788564.399,1081509.792,3005.455
250	788574.575,1081512.858,3005.534	-2	788573.503,1081514.304	3005.57	-2	788572.430,1081515.750,3005.534
260	788582.607,1081518.816,3005.418	-2	788581.534,1081520.261	3005.454	-2	788580.462,1081521.707,3005.418
270	788590.638,1081524.773,3005.104	-2	788589.566,1081526.219	3005.14	-2	788588.494,1081527.665,3005.104
280	788598.670,1081530.731,3004.643	-2	788597.598,1081532.176	3004.679	-2	788596.526,1081533.622,3004.643
PC3 286.657	788604.017,1081534.696,3004.331	-2	788602.945,1081536.142	3004.367	2	788601.872,1081537.588,3004.403
290	788606.681,1081536.588,3004.174	-2	788605.670,1081538.077	3004.21	2	788604.659,1081539.566,3004.246
300	788615.091,1081541.559,3003.704	-2	788614.273,1081543.163	3003.74	2	788613.456,1081544.766,3003.776
310	788624.054,1081545.443,3003.294	-2	788623.443,1081547.136	3003.33	2	788622.831,1081548.829,3003.366
320	788633.431,1081548.179,3003.030	-2	788633.036,1081549.936	3003.066	2	788632.641,1081551.692,3003.102
PT3 329.560	788642.649,1081549.683,3002.895	-2	788642.465,1081551.473	3002.931	2	788642.282,1081553.264,3002.967
330	788643.087,1081549.727,3002.888	-2	788642.904,1081551.518	3002.924	1.71	788642.720,1081553.309,3002.955
340	788653.035,1081550.745,3002.640	-2	788652.852,1081552.535	3002.676	-2	788652.669,1081554.326,3002.640
350	788662.983,1081551.762,3002.229	-2	788662.800,1081553.553	3002.265	-2	788662.617,1081555.343,3002.229
360	788672.931,1081552.780,3001.701	0.57	788672.748,1081554.570	3001.691	-2	788672.565,1081556.361,3001.655
PC4 362.149	788675.069,1081552.998,3001.582	2	788674.886,1081554.789	3001.546	-2	788674.703,1081556.579,3001.510
370	788683.049,1081554.395,3000.997	2	788682.613,1081556.141	3000.961	-2	788682.177,1081557.888,3000.925
380	788692.786,1081557.791,3000.227	2	788692.042,1081559.430	3000.191	-2	788691.297,1081561.069,3000.155
390	788701.750,1081562.892,2999.457	2	788700.721,1081564.369	2999.421	-2	788699.692,1081565.846,2999.385
400	788709.643,1081569.530,2998.702	2	788708.364,1081570.796	2998.666	-2	788707.085,1081572.063,2998.630
PT4 404.673	788712.889,1081573.098,2998.364	2	788711.508,1081574.252	2998.328	-2	788710.126,1081575.405,2998.292
410	788716.304,1081577.187,2997.929	-1.55	788714.922,1081578.341	2997.957	-2	788713.540,1081579.495,2997.921
420	788722.713,1081584.863,2997.259	-2	788721.332,1081586.017	2997.295	-2	788719.950,1081587.170,2997.259

Continuación **Tabla 3.3**

0004401 17OCT2017

Abscisa	Coordenadas borde izquierdo (N,E,Cota)	Peralte izq. %	Coordenadas eje (N,E)	Cota rasante (m)	Peralte der. %	Coordenadas borde derecho (N,E,Cota)
430	788729.123,1081592.539,2996.645	-2	788727.741,1081593.693	2996.681	-2	788726.359,1081594.846,2996.645
440	788735.532,1081600.215,2996.079	-2	788734.150,1081601.368	2996.115	1.89	788732.769,1081602.522,2996.149
PC5 440.163	788735.637,1081600.340,2996.070	-2	788734.255,1081601.494	2996.106	2	788732.873,1081602.647,2996.142
450	788742.255,1081607.285,2995.560	-2	788741.036,1081608.610	2995.596	2	788739.817,1081609.934,2995.632
460	788749.855,1081613.397,2995.104	-2	788748.823,1081614.872	2995.14	2	788747.791,1081616.346,2995.176
470	788758.201,1081618.444,2994.751	-2	788757.374,1081620.043	2994.787	2	788756.547,1081621.642,2994.823
PT5 477.296	788764.675,1081621.402,2994.561	-2	788764.007,1081623.074	2994.597	2	788763.340,1081624.745,2994.633
480	788767.186,1081622.405,2994.505	-2	788766.519,1081624.077	2994.541	0.2	788765.851,1081625.748,2994.544
490	788776.473,1081626.114,2994.335	-2	788775.805,1081627.786	2994.371	-2	788775.138,1081629.457,2994.335
500	788786.094,1081628.987,2994.148	-2	788785.092,1081631.494	2994.202	-2	788784.091,1081634.002,2994.148
510	788795.380,1081632.696,2993.916	-2	788794.379,1081635.203	2993.97	-2	788793.378,1081637.711,2993.916
520	788804.333,1081637.241,2993.606	-2	788803.666,1081638.912	2993.642	-2	788802.998,1081640.584,2993.606
530	788813.620,1081640.950,2993.181	-2	788812.952,1081642.621	2993.217	-2	788812.285,1081644.293,2993.181
534.649	788817.938,1081642.674,2992.961	-2	788817.270,1081644.346	2992.997	-2	788816.603,1081646.017,2992.961

Continuación **Tabla 3.3**

0004401 17OCT2017

CAPÍTULO 4

RECOMENDACIONES PARA LA CALIFICACIÓN DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE DE LA SUBRASANTE DE LA VÍA

90

0004401 17OCT2017

CAPÍTULO 4
RECOMENDACIONES PARA LA CALIFICACIÓN DE LA CAPACIDAD DE SOPORTE DE LA SUBRASANTE DE LA VÍA

Las presentes recomendaciones corresponden a una adaptación de la metodología consignada en el Manual de diseño de pavimentos flexibles para vías de bajo tránsito, documento vigente en el Instituto Nacional de Vías.

4.1 Identificación de las Unidades Homogéneas de Diseño

La primera actividad a realizar es establecer si la subrasante a lo largo del proyecto se puede considerar homogénea, caso en el que se trataría de una única Unidad Homogénea de Diseño o si por el contrario la subrasante presenta cambios significativos lo que obligaría a definir dos o más Unidades Homogéneas de Diseño.

Para ello se requiere:

a. Elegir las abscisas para la realización de los sondeos a lo largo del eje del proyecto.

Previamente se ha debido localizar el eje de la vía de conformidad con el diseño geométrico. No sobra recordar que la localización consiste en materializar la trayectoria del eje a lo largo de las tangentes y curvas mediante estacas (u otro elemento adecuado) espaciadas cada diez (10) metros. Si una curva tiene radio menor a sesenta y cinco (65) metros el espaciamiento entre estacas dentro de la curva debe ser de cinco (5) metros.

Los sondeos se deberán hacer en el eje de la vía cada doscientos cincuenta metros (250 m) con una profundidad mínima de un metro con cincuenta centímetros (1,50 m) medidos a partir de la subrasante y un diámetro tal que permita llevar a cabo las tareas descritas en el numeral siguiente. Generalmente treinta (30) centímetros de diámetro es suficiente.

b. Ejecutar los sondeos, hacer los ensayos de campo y tomar las muestras para los ensayos de laboratorio.

En cada sondeo se deberá medir el espesor del eventual afirmado existente, realizar, si la naturaleza del suelo de subrasante lo permite, el ensayo de Penetrómetro Dinámico de Cono (PDC) y tomar muestras alteradas del material de la subrasante. El tamaño de las muestras deberá ser suficiente para realizar los ensayos de granulometría y límites de Atterberg.

0004401 17OCT2017

El ensayo con el PDC se deberá extender hasta una profundidad mínima de ochenta centímetros (0.80 m) y ejecutarse siguiendo la norma vigente en el INVIAS.

Si la utilización del PDC no es posible porque al momento de realizar el ensayo se encuentran partículas con tamaños que obstaculicen el paso de la varilla de penetración distorsionando los resultados, la determinación del CBR se haría mediante correlaciones con las propiedades índice del material, tales como su granulometría y su plasticidad. La ejecución misma del ensayo le irá indicando al ingeniero y al operario del equipo si el suelo permite o no la realización del ensayo con resultados confiables.

En cada una de las abscisas en las que se haya realizado el ensayo de PDC, el ingeniero, con base en el análisis del perfil del Número de golpes vs. Profundidad de penetración, deberá adoptar, con un criterio razonablemente conservador, el valor del Índice PDC en mm/golpe que represente la resistencia a la penetración en dicha abscisa.

Con los resultados de los sondeos se deberá dibujar el perfil de espesores de afirmado y el perfil del Índice PDC. De su análisis el ingeniero deberá decidir si todo el tramo del proyecto es lo suficientemente homogéneo como para considerarlo como una única Unidad de Diseño o si es necesario subdividirlo en dos o más Unidades Homogéneas de Diseño. La imposibilidad de llevar a cabo el ensayo de PDC por las condiciones granulométricas del suelo también sería criterio válido para la definición de dichas Unidades.

El resultado de esta actividad será la identificación de las Unidades Homogéneas de Diseño, indicando en forma precisa las abscisas que corresponden a sus fronteras.

4.2 Posición del nivel freático

Con base en la información obtenida en los sondeos el ingeniero deberá establecer los sectores en los que el nivel freático se encuentra a menos de un metro con cincuenta centímetros (1.50 m) del nivel de la subrasante, caso en el cual se tendrían que proveer subdrenes longitudinales para abatir dicho nivel freático.

4.3 Clasificación de los suelos de subrasante

A las muestras tomadas en los sondeos se les deberá realizar ensayos de granulometría y Límites de Atterberg atendiendo las Normas vigentes en el INV. Con los resultados de dichos ensayos se deberá clasificar el suelo utilizando el Sistema Unificado.

Para ello se deberá hacer uso de la Tabla 4.1 y de la Figura 4.1. A continuación se presentan tres ejemplos de clasificación de suelos partiendo de los resultados de los ensayos de granulometría, límite líquido y límite plástico.

Ejemplo No. 1 Gravas

Se tiene un suelo con las siguientes características:

0004401 17OCT2017

Tamiz		% Pasa
Normal (mm)	Alterno	
12.7	(½")	100
19.05	(3/4")	60
4.76	(No.4)	38
2.0	(No.10)	25
0.425	(No.40)	18
0.15	(No.100)	10
0.074	(No.200)	4
LL		14
LP		10

Los pasos a seguir para la clasificación de este suelo son los siguientes:

a. Determinar si el suelo es grueso o fino.

%Pasa No. 200 = 4% < 50%, es decir más de la mitad del material es retenido en el tamiz No. 200, por tanto es un suelo grueso.

b. Determinar si se trata de una grava o una arena.

Fracción de grava, A = %Ret. No.4 = 62%

Fracción de arena, B = %Pasa No.4 - %Pasa No.200 = 38% – 4% = 34%

$A > B \Rightarrow$ Grava

0004401 17OCT2017

SUELOS DE PARTÍCULAS GRUESAS (MAS DE LA MITAD DEL MATERIAL ES RETENIDO EN EL TAMIZ No.200) (USAR LA CURVA GRANULOMÉTRICA PARA IDENTIFICAR LAS FRACCIONES DE SUELO)	GRAVAS (MAS DE LA MITAD DE LA FRACCIÓN GRUESA ES RETENIDA EN EL TAMIZ No.4) (Use la curva granulométrica para identificar las fracciones de suelo)	GRAVAS LIMPIAS (POCO O NADA DE PARTÍCULAS FINAS)	GW	LOS PORCENTAJES DE GRAVA Y ARENA SE DETERMINAN DE LA CURVA GRANULOMÉTRICA DEPENDIENDO DEL PORCENTAJE DE FINOS (FRACCIÓN QUE PASA EL TAMIZ No.200). LOS SUELOS GRUESOS SE CLASIFICAN COMO SIGUE : MENOS DE 5% : GW, GP, SW, SP MÁS DE 12% : GM, GC, SM, SC	COEF. DE UNIFORMIDAD (Cu) : $C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 4$ COEF. DE CURVATURA (Cc) : $1 \le C_u = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \le 3$
			GP		NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADACIÓN PARA GW
		GRAVAS CON FINOS (CANT. APRECIABLE DE PART. FINAS)	GM		LIMITES DE PLASTICIDAD DEBAJO DE LA LINEA "A" o Ip < 6
			GC		LIMITES DE PLASTICIDAD ARRIBA DE LA LINEA "A" CON Ip > 6
	ARENAS (MAS DE LA MITAD DE LA FRACCIÓN GRUESA PASA EL TAMIZ No.4)	ARENAS LIMPIAS (POCO O NADA DE PARTÍCULAS FINAS)	SW		$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} > 6$ $1 \le C_u = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} \le 3$
			SP		NO SATISFACEN TODOS LOS REQUISITOS DE GRADACIÓN PARA SW
		ARENAS CON FINOS (CANT. APRECIABLE DE PART. FINAS)	SM		LIMITES DE PLASTICIDAD DEBAJO DE LA LINEA "A" o Ip < 6
			SC		LIMITES DE PLASTICIDAD ARRIBA DE LA LINEA "A" CON Ip > 6
SUELOS DE PARTÍCULAS FINAS (MAS DE LA MITAD DEL MATERIAL PASA EL TAMIZ No.200)	LIMOS Y ARCILLAS LL < 50		ML	EQUIVALENCIA DE SIMBOLOS G : GRAVA M : LIMO O : SUELOS ORGÁNICOS W : BIEN GRADUADOS L : BAJA COMPRESIBILIDAD S : ARENA C : ARCILLA Pt : TURBA P : MAL GRADUADA H : ALTA COMPRESIBILIDAD	
			CL		
			OL		
	LIMOS Y ARCILLAS LL > 50		MH		
			CH		
			OH		
SUELOS ALTAMENTE ORGÁNICOS			Pt		

Tabla 4.1 Sistema de Clasificación Unificada (USCS)

0004401 17OCT2017

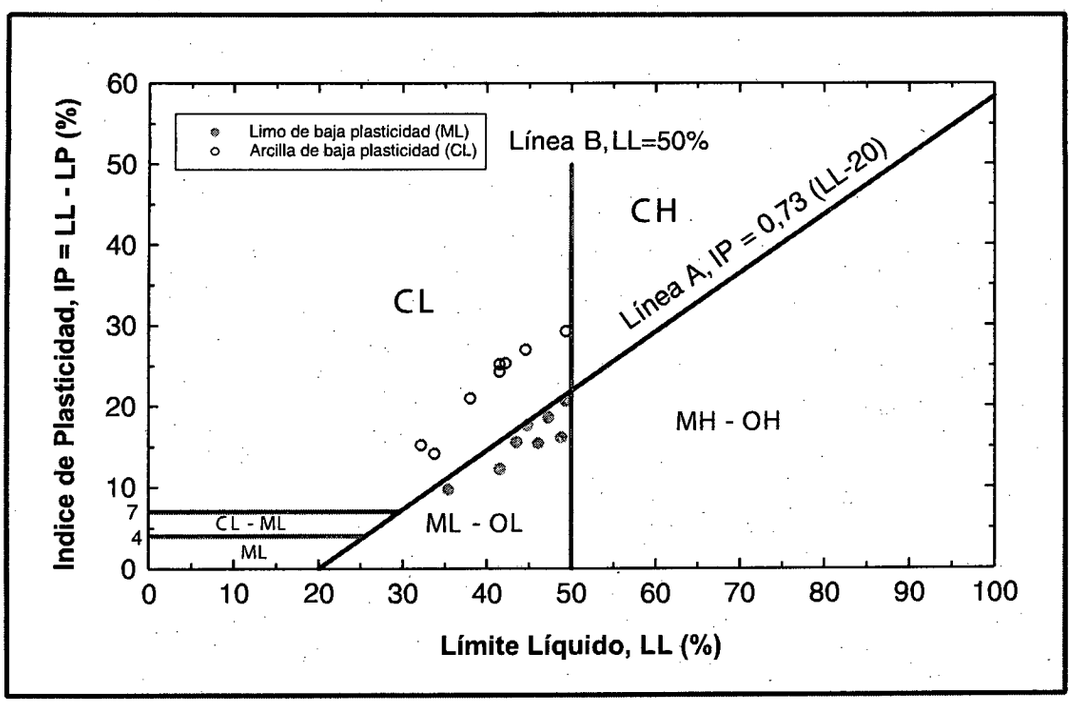


Figura 4.1 Carta de Plasticidad de Casagrande

c. Determinar si es una grava "limpia" o "con finos".

El criterio de clasificación es el siguiente:

% Fracción fina (Pasa tamiz de 0.074 mm)	Clasificación
< 5	Limpio
> 12	Grava o arena con finos
5 - 12	Doble símbolo

El porcentaje que pasa el tamiz de 0.074 mm (No. 200) es 4%, por lo tanto se trata de una grava limpia.

0004401 17OCT2017

d. Determinar si el material es bien gradado o pobremente gradado.

El criterio es:

Suelo	Descripción	Símbolo	Criterio
Gravas	Bien gradada	GW	$C_u \geq 4$ y $1 \leq C_c \leq 3$
	Mal gradada	GP	$C_u < 4$ y/o $C_c < 1$; $C_c > 3$
Arenas	Bien gradada	SW	$C_u \geq 6$ y $1 \leq C_c \leq 3$
	Mal gradada	SP	$C_u < 6$ y/o $C_c < 1$; $C_c > 3$

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{19.05}{0.150} = 127 > 4$$

$$C_c = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{(2.36)^2}{0.150 \times 19.05} = 1.95, \text{ se encuentra entre 1 y 3}$$

Al cumplir con ambos criterios, el suelo clasifica como una Grava bien gradada "GW".

e. Determinar el tipo de material de la fracción que pasa el tamiz de 0.074 mm (No. 200).

Por tratarse de un material limpio, no es necesario determinar el tipo de material de la fracción que pasa el tamiz de 0.074 mm (No. 200).

d. Clasificación.

El material se clasifica como: "GW".

Ejemplo No. 2 Arenas
Se tiene un suelo con las siguientes características:

0004401 17OCT2017

Tamiz		% Pasa
Normal (mm)	Alterno	
19.05	(3/4")	100
4.76	(No.4)	70
2.0	(No.10)	60
0.425	(No.40)	45
0.15	(No.100)	30
0.074	(No.200)	10
LL		23
LP		20

Los pasos a seguir para la clasificación de este suelo son los siguientes:

a. Determinar si el suelo es grueso o fino

%Pasa No.200 = 10% < 50%, es decir, más de la mitad del material es retenido en el tamiz No. 200, por tanto es un suelo grueso.

b. Determinar si se trata de una grava o una arena

Fracción de grava, A = %Ret. No.4 = 30%

Fracción de arena, B = %Pasa No.4 - %Pasa No. 200 = 70% – 10% = 60%

B > A $\Rightarrow$ Arena

c. Determinar si es una arena "limpia" o "con finos".

El criterio de clasificación es el siguiente:

77

0004401 17OCT2017

% Fracción fina (Pasa tamiz de 0.074 mm)	Clasificación
< 5	Limpio
> 12	Grava o arena con finos
5 - 12	Doble símbolo

El porcentaje que pasa el tamiz de 0.074 mm (No. 200) es 10%, por lo tanto se trata de una arena que presenta doble símbolo.

d. Determinar si el material es bien o mal gradado.

De conformidad con los criterios descritos en el ejemplo anterior, se tiene:

$$C_u = \frac{D_{60}}{D_{10}} = \frac{2.0}{0.074} = 27 > 6$$

$$Cc = \frac{(D_{30})^2}{D_{10} \times D_{60}} = \frac{(0.150)^2}{0.074 \times 2.0} = 0.15, \text{ no se encuentra entre 1 y 3}$$

Al no cumplir con ambos criterios, el suelo corresponde a una arena mal gradada "SP".

e. Determinar el tipo de material de la fracción que pasa el tamiz de 0.074 mm (No.200), para establecer el símbolo complementario de la clasificación, debido a que el porcentaje de la fracción fina se encuentra entre 5% y 12%.

Para ello se utiliza el IP y la Carta de Plasticidad de Casagrande, Figura 4.1.

$$IP_{material} = LL - LP = 23 - 20 = 3\%.$$

$$IP_{LINEA\ A} = 0.73\ (LL - 20) = 0.73\ (23 - 20) = 2.2\%$$

$IP_{material} > IP_{LINEA\ A}$, e $IP_{material} < 4\%$ $\Rightarrow$ "Limo".

98

0004401 17OCT2017

f. Clasificación.

El material se clasifica como: "SP – SM".

Ejemplo No. 3 Suelos de partículas finas
Se tiene un suelo con las siguientes características:
Suelo fino
Color negro
LL = 85%
LL seco al horno = 78%
LP = 45%

a. Determinar si es limo o arcilla.

$$IP_{material} = LL - LP = 85 - 45 = 40\%$$

$$IP_{LINEA\ A} = 0.73\ (LL - 20) = 0.73\ (85 - 20) = 47.5\%$$

$$IP_{material} < IP_{LINEA\ A} \Rightarrow \text{"Limo"}.$$

b. Determinar si es de alta o baja compresibilidad.

Para esto, se debe tener en cuenta el LL de la línea B en la Carta de Plasticidad (Figura 4.1).

$$LL_{material} = 85\% > LL_{LINEA\ B} = 50\% \Rightarrow \text{"Alta compresibilidad"}.$$

c. Determinar si se trata de un material orgánico o inorgánico.

Los parámetros indicativos son el color y la relación entre el LL seco al horno y el LL real.
Color : Negro, lo cual es indicio de suelo orgánico

Si la relación entre $LL_{seco\ al\ horno} / LL_{real} \leq 0.75 \Rightarrow$ "Suelo Orgánico".

$$\frac{LL_{seco\ al\ horno}}{LL_{real}} = \frac{78\%}{85\%} = 0.92 > 0.75 \Rightarrow \text{"Inorgánico"}.$$

d. Clasificación.

El material se clasifica como: "MH".

79

0004401 17OCT2017

4.4 Calificación del potencial de expansión del suelo de la subrasante de cada una de las Unidades de Diseño

Para ello el ingeniero deberá analizar la clasificación de las muestras de subrasante tomadas y sus valores del límite líquido y el índice plástico y compararlos con la correlación presentada en la Tabla 4.2 en la que se indica el potencial expansivo en función de los límites de consistencia. No sobra mencionar que un elemento de juicio que debe usar el ingeniero al momento de evaluar las probables características expansivas de los suelos de la zona es la existencia de antecedentes que indiquen problemas con obras ya construidas.

LL (%)	IP (%)	Clasificación del hinchamiento potencial
> 60	> 35	Alto
50 - 60	25 - 35	Marginal
50 <	< 25	Bajo

Tabla 4.2 Correlación Límites de consistencia vs. Potencial de expansión

En el evento en que el análisis no permita una decisión contundente se recomienda tomar suelo de las muestras alteradas a las que se les realizaron los límites de Atterberg y hacer en el laboratorio al menos dos (2) ensayos de Potencial de Cambio Volumétrico (PCV) en el aparato de Lambe. Este es un ensayo sencillo que permitiría salir de dudas. La realización del ensayo se debe hacer siguiendo la Norma vigente en el INV. En la Tabla 4.3 se muestra la correlación entre el valor de PVC y el potencial expansivo del suelo.

P.V.C	Grado de expansión
< 2	No crítico
2 - 4	Marginal
4 - 6	Crítico
> 6	Muy crítico

Tabla 4.3 Correlación PVC vs Expansión

4.5 Determinación del CBR representativo de la subrasante de cada Unidad Homogénea de Diseño

Para la determinación del CBR de la subrasante de cada Unidad Homogénea de Diseño se deberá establecer al menos tres (3) valores de CBR.

80

0004401 17OCT2017

Mediante correlaciones calcular el valor de CBR de la subrasante en cada sondeo. Se pueden presentar dos casos:

CASO 1

Que la naturaleza del suelo haya permitido realizar el ensayo de PDC sin inconvenientes. Lo anterior significa que para la abscisa del sondeo se cuenta con un valor del Índice PDC expresado en mm/golpe. El Cuerpo de Ingenieros de los Estados Unidos ofrece las siguientes correlaciones:

- Correlación aplicable en general a todos los tipos de suelos.

$$CBR = \frac{292}{(PDC)^{1.12}} \qquad (1)$$

donde:
CBR: en porcentaje
PDC: índice PDC, en mm/golpe

- Correlación específica para suelos clasificados como CL y que presenten un valor de CBR igual o menor a diez por ciento (10%).

$$CBR = \frac{1}{(0.017019 \times PDC)^2} \qquad (2)$$

donde:
CBR: en porcentaje
PDC: Índice PDC, en mm/golpe

Para establecer si la determinación del valor de CBR de un suelo clasificado como CL se debe hacer con la correlación indicada en la expresión (2), en primera instancia se deberá aplicar la correlación general de la expresión (1). Si el CBR calculado resulta igual o menor a diez por ciento (10%), entonces se deberá afinar el cálculo aplicando la correlación específica de la expresión (2).

- Correlación específica para suelos clasificados como CH.

$$CBR = \frac{1}{0.002871 \times PDC} \qquad (3)$$

donde:
CBR: en porcentaje
PDC: índice PDC, en mm/golpe

CASO 2

Que la naturaleza del suelo no haya permitido realizar el ensayo de PDC debido a la presencia de

0004401 17OCT2017

partículas minerales de tamaño significativo. Lo anterior implica que para la abscisa del sondeo no se cuenta con un valor del Índice PDC y que es necesario recurrir a la granulometría y el Índice de Plasticidad para estimar el valor del CBR.

Para vías con bajos volúmenes de tránsito la Guía de Diseño de Pavimentos AASHTO 2002 propone utilizar para la determinación del CBR de la subrasante correlaciones con las propiedades índice de los suelos.

Las correlaciones son las siguientes:

- Correlación para suelos granulares limpios, típicamente no plásticos, en los que el parámetro (w x IP) es igual a cero. El parámetro (w x IP) se denomina Índice de Plasticidad Ponderado y es el producto de la fracción que pasa el tamiz de 0.074 mm (No.200) por el Índice de Plasticidad.

$$CBR = 28.09 \times (D_{60})^{0.358} \qquad (4)$$

donde:
CBR: en porcentaje
D_{60} : Abertura del tamiz que deja pasar el sesenta por ciento (60%) del suelo, en peso. Se expresa en milímetros (mm). Este valor se lee en la curva granulométrica.

La correlación está limitada a valores de D60 mayores de 0.01 mm y menores de 30 mm. Para valores de D60 menores de 0.01 mm se recomienda adoptar un valor de CBR igual a cinco por ciento (5%). Para valores de D60 mayores de 30 mm se recomienda adoptar un valor de CBR igual a noventa y cinco por ciento (95%).

- Correlación para suelos que presentan plasticidad, es decir que el parámetro (w x IP) es mayor que cero, y la fracción que pasa el tamiz de 0.074 mm (No. 200) es mayor del once por ciento (11%).

$$CBR = \frac{75}{1 + 0.728\,(w \times IP)} \qquad (5)$$

donde:
w x IP: Índice de Plasticidad ponderado = Fracción que pasa el tamiz de 0.074 mm (No.200) x Índice de Plasticidad
w: Fracción que pasa el tamiz de 0.074 mm (No. 200), en tanto por uno
IP: Índice de Plasticidad, en porcentaje
CBR: en porcentaje

Si se presenta un suelo que tenga plasticidad y una fracción que pasa el tamiz de 0.074 mm (No. 200) igual o menor al once por ciento (11%), el ingeniero deberá analizar los valores que presente del

82

0004401 17OCT2017

Índice de Plasticidad, el valor de D60 y la fracción que pasa el tamiz de 0.074 mm (No. 200), para decidir si utiliza para el cálculo del CBR la expresión (4) o la expresión (5). La (4) aplica a suelos cuyo comportamiento tiende a ser netamente friccionante, mientras que la (5) correlaciona mejor en los suelos con un comportamiento cohesivo-friccionante. A manera de guía adicional, en la Figura 4.2 se presenta la correlación general que ofrece la AASHTO entre la clasificación del suelo y su probable valor de CBR.

En cuanto a las expresiones (4) y (5), es evidente que el valor de CBR que presenta un suelo es función directa de su naturaleza y de sus condiciones de densidad y humedad. Las correlaciones presentadas por la AASHTO determinan el CBR en función de las características granulométricas y el índice de plasticidad, sin considerar el estado de densidad y humedad que posee el suelo. Dichas correlaciones, obtenidas del análisis de la extensa base de datos de la AASHTO, ofrecen confiabilidad suficiente para estimar el valor del CBR de la subrasante en carreteras en las que una eventual falla prematura del pavimento no conllevaría consecuencias económicas graves, como es el caso de las vías con bajos volúmenes de tránsito.

Definidos los valores de CBR, determinados mediante correlaciones con el PDC o las propiedades índice de los suelos, el ingeniero deberá organizarlos de mayor a menor y analizarlos en conjunto para elegir un valor de CBR representativo de la capacidad de soporte de la Unidad Homogénea de Diseño. Sería prudente utilizar un criterio conservador sin que esto implique elegir el menor valor de todos.

4.6 Subrasante constituida por suelos expansivos

Si el ingeniero considera que la subrasante de la Unidad de Diseño es expansiva se tendría que optar por una de dos soluciones:

- Excavar, obviamente retirando el afirmado existente, al menos un metro (1,0 m) por debajo de la subrasante del proyecto y reemplazar este espesor con un material seleccionado que cumpla las exigencias establecidas en el Artículo "Terraplenes" de las Especificaciones Generales de Construcción de Carreteras vigentes en el Instituto Nacional de Vías.

- Elevar la rasante del proyecto, si geométricamente es factible, hasta una cota en la que la subrasante de la carretera una vez construida, quede alejada aproximadamente un metro (1 m) del estrato expansivo. En este caso el terraplén se construiría sobre el afirmado existente. Igualmente, el material del terraplén deberá cumplir con lo especificado en el Artículo "Terraplenes".

0004401 17 OCT 2017

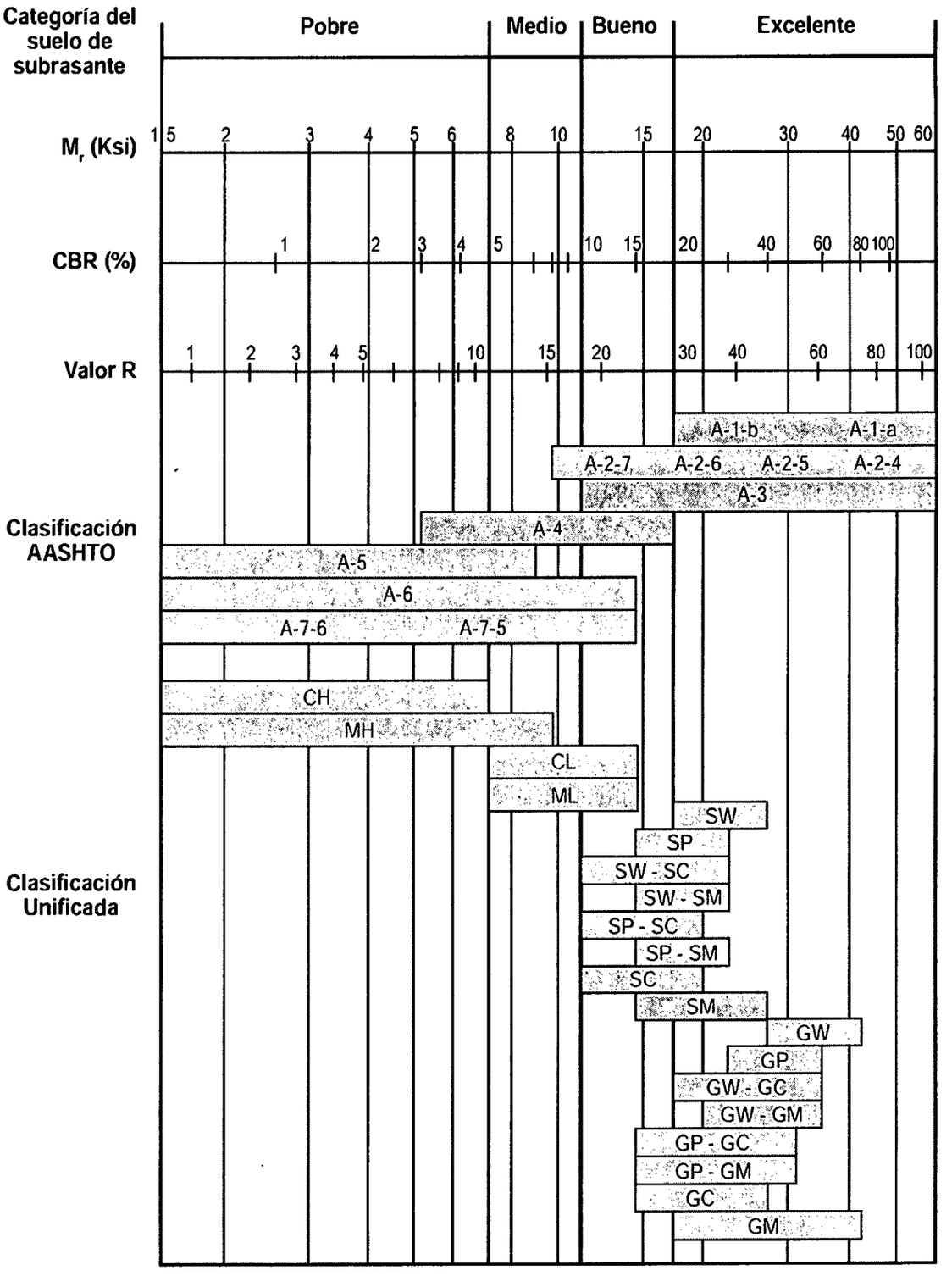


Figura 4.2 Correlación AASHTO. Clasificación del suelo vs CBR

0004401 17OCT2017

CAPÍTULO 5

RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DEL DRENAJE SUPERFICIAL DE LA VÍA

0004401 17OCT2017

CAPÍTULO 5
RECOMENDACIONES PARA EL DISEÑO DEL DRENAJE SUPERFICIAL DE LA VÍA

5.1 Objetivo del drenaje de la vía

El drenaje de la vía tiene como principal objetivo reducir al máximo posible la cantidad de agua que llega a la vía y darle salida rápida de tal manera que no destruya progresivamente la capa de rodadura de la vía y su cimentación.

Consideraciones a tener en cuenta para lograr un buen drenaje:

- El agua no debe circular en cantidades excesivas por la superficie de rodadura formando charcos y baches.

- Evitar que el agua de las cunetas humedezca los terraplenes originando asentamientos en la corona de la vía.

- Evitar que los taludes de los cortes en los suelos no cohesivos se saturen con peligro de derrumbes y deslizamientos de la banca.

- Impedir que el agua de los arroyos y hondonadas sean remansadas por los terraplenes con el peligro de erosión y arrastre de sedimentos.

- Evitar que las aguas subterráneas reblandezcan la cimentación del pavimento.

5.2 Determinación de la Intensidad de la lluvia (mm/h) en la zona del proyecto

5.2.1 Identificación de la Estación Meteorológica representativa. Serie histórica de la precipitación

Consultar en el IDEAM los registros históricos de la precipitación máxima registrada en veinticuatro (24) horas en la estación meteorológica representativa más cercana a la ubicación del proyecto.

La estación meteorológica puede corresponder a una Estación Pluviométrica dotada de un pluviómetro o recipiente que permite medir la cantidad de lluvia caída entre dos observaciones consecutivas.

Si la estación no cuenta con dichos registros, se obtendrán los registros históricos de la precipitación

0004401 17OCT2017

diaria medidos en la estación meteorológica representativa de la zona del proyecto o de estaciones meteorológicas de la zona del proyecto que más se asemejen a las condiciones climatológicas del sitio del proyecto.

Identificar, para cada año de la serie histórica, el valor máximo de precipitación registrado en veinticuatro (24) horas. Es decir, establecer el valor de la precipitación del día más lluvioso de dicho año.

5.2.2 Cálculo de la Intensidad de la lluvia (mm/h)

Para el cálculo de la intensidad de la lluvia en vías terciarias puede ser aplicada la siguiente metodología:

1. Identificar, para cada año de la serie histórica, el valor máximo de precipitación registrado en veinticuatro (24) horas.

2. La intensidad de la lluvia calcularla para diferentes duraciones de aguacero y para cada año de la serie histórica. Generalmente se utilizan duraciones de aguacero de 5, 10, 15, 20, 25 y 30 minutos.

3. Aplicar los valores de los periodos de retorno (T) recomendados en el Manual de Drenaje Vial del INV 2009, que se indican en la Tabla 5.1.

Obras de drenaje vial	Tr
Drenaje superficial	2
Cunetas	5
Zanjas de coronación	10
Estructuras de caída	10
Alcantarillas de 0.9m de diámetro	10
Alcantarillas mayores a 0.90m de diámetro	20
Puentes menores (luz menor a 10m)	25
Puentes de luz igual a 10m y menor a 50m	50
Puentes de luz mayor o igual a 50m	100

Tabla 5.1 Periodos de retorno para el diseño de obras de drenaje vial

4. Para determinar la intensidad de la lluvia se puede aplicar la Metodología Simplificada de cálculo de las curvas intensidad – duración – frecuencia indicada en el Manual de Drenaje de Carreteras del INV 2009, en el cual se recomienda la utilización de la precipitación máxima promedio anual en 24 horas y aplicar la expresión que a continuación se indica:

$$i = \frac{a \times T^{b} \times M^{d}}{\frac{t^{c}}{60}}$$

i : Intensidad de precipitación, en milímetros por hora (mm/h).
T : Periodo de retorno, en años.
M : Precipitación máxima promedio anual en 24 h a nivel multianual.
t : Duración de la lluvia, en minutos (min).

87

0004401 17OCT2017

a, b, c, d : Parámetros de ajuste de la regresión. Estos parámetros dependen de la región del país donde está ubicada la estación meteorológica. Las regiones y los valores de los parámetros se muestran en la Tabla 5.2 y su ubicación en la Figura 5.1.

REGIÓN		a	b	c	d
Andina	(R1)	0.94	0.18	0.66	0.83
Caribe	(R2)	24.85	0.22	0.5	0.1
Pacífico	(R3)	13.92	0.19	0.58	0.2
Orinoquia	(R4)	5.53	0.17	0.63	0.42

Tabla 5.2 Parámetros según regiones del país / Valores obtenidos del Manual de Drenaje para carreteras del INV- 2009

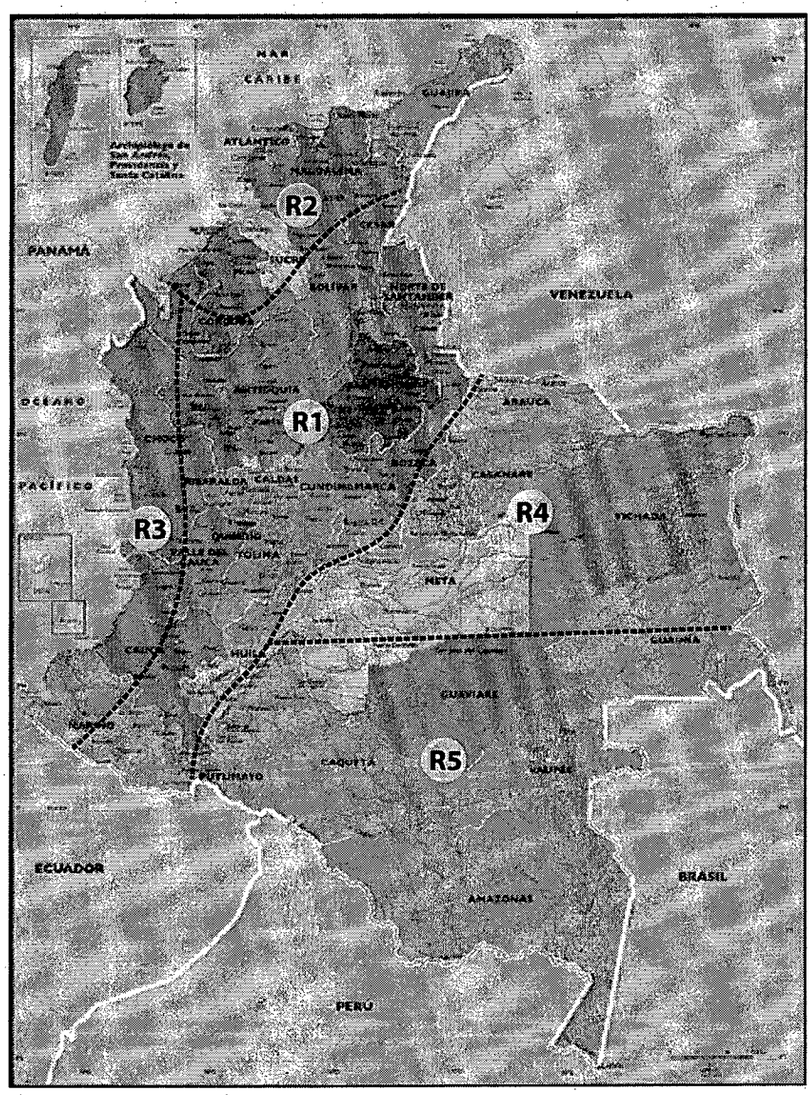


Figura 5.1 Regiones en Colombia para definición de parámetros a, b, c y d.
(Regiones adoptadas del Manual de drenaje de carreteras INV-figura 2.13)

0004401 17OCT2017

5.2.3 Ejemplo de aplicación para obtener las curvas I-D-F

Utilizando los datos de una estación meteorológica ubicada en la costa atlántica, Región R2, obtener las curvas I-D-F, los datos se indican en la Tabla 5.3.

PRECIPITACIÓN MÁXIMA EN 24 HORAS (mm.)														
AÑO	ENERO	FEBRE	MARZO	ABRIL	MAYO	JUNIO	JULIO	AGOST	SEPTI	OCTUB	NOVIE	DICIE	ANUAL	Valor Max. en el año
1983	87.6	87.6												87.6
1984	12.9	63.7	37.3	60.9	58.2	104.3	52.7	54.0	92.3	38.2	30.7	16.8	104.3	104.3
1985	0.0	12.2	41.2	55.2	52.5	83.4	71.3	88.0	56.3	45.0	57.0	83.9	88.0	88.0
1986	26.0	45.5	46.6	62.4	91.6	47.0	63.7	72.5	21.3	91.6				91.6
1987	89.5	41.5	77.7	76.0	80.7	40.6	24.3	90.4	39.9	45.8	90.4			90.4
1988	4.5	12.9	34.8	30.6	99.5	60.0	74.7	73.5	66.6	37.4	99.5			99.5
1989	20.8	60.0	21.2	66.0	57.0	28.6	56.3	145.0	70.0	77.6	28.4	6.4	145.0	145.0
1990	17.0	35.0	44.0	37.0	118.0	52.0	24.0	40.0	66.0	39.0	63.0	60.0	118.0	118.0
1991	0.0	24.0	37.0	75.0	77.0	148.5	76.0	79.0	40.0	54.0	43.0	19.0	148.5	148.5
1992	19.0	32.0	25.0	74.0	84.0	36.0	42.0	72.0	31.0	44.0	18.0	84.0		84.0
1993	79.0	36.0	51.6	55.0	74.0	44.0	66.0	44.0	53.0	104.0	45.0	47.0	104.0	104.0
1994	62.0	57.0	39.8	46.6	88.0	52.0	52.0	54.0	39.0	62.0	20.0	16.0	88.0	88.0
1995	32.7	21.0	57.0	62.0	74.0	63.0	103.0	34.0	59.0	120.8	42.0	24.0	120.8	120.8
1996	12.0	54.0	20.0	50.0	70.0	70.0	70.0	71.0	41.0	48.0	95.0	62.0	95.0	95.0
1997	19.0	66.0	14.0	35.0	93.0	99.0	65.0	53.0	34.0	56.0	70.0	27.0	99.0	99.0
1998	13.0	54.0	65.0	83.0	58.0	40.0	63.0	40.0	38.0	45.0	44.0	27.0	83.0	83.0
1999	48.0	83.0	135.0	91.0	42.0	37.0	17.0	46.0	76.0	45.0	25.8	135.0		135.0
2000	23.2	14.0	46.0	80.0	80.0	65.0	60.0	81.0	18.0	54.0	81.0			81.0
2001	1.0	9.0	55.0	53.0	63.0	64.0	44.0	53.0	18.0	42.0	30.0	64.0		64.0
2002	*	1.2	74.0	68.0	64.0	88.0	39.0	52.0	38.0	45.0	72.0	21.0	88.0	88.0
2004	*	62.0	80.0	96.0	72.0	64.0	77.0	35.0	16.0	96.0				96.0
2005	32.0	96.0	88.0	53.0	140.0	122.2	49.0	87.0	42.2	16.0	140.0			140.0
2006	25.0	63.0	101.0	96.0	*	*	39.0	*	101.0					101.0
2007	11.0	*	*	37.0	58.0	60.0	91.0	50.0	13.0	91.0				91.0
2008	34.0	5.9	60.0	26.0	65.0	53.0	45.0	109.0	53.0	110.0	70.0	42.0	110.0	110.0
2009	28.6	26.0	53.0	100.0	51.6	90.0	60.0	80.0	53.0	66.0	18.0	100.0		100.0
MEDIOS	24.10	37.60	44.90	63.60	73.60	71.70	62.00	64.80	54.10	66.60	45.90	34.60	53.60	102.0
MAXIMOS	79.00	96.00	83.00	135.00	118.00	148.50	140.00	145.00	92.30	120.80	95.00	87.60	148.50	
MINIMOS	0.00	1.20	12.90	26.00	30.60	28.60	24.00	17.00	24.30	18.00	18.00	6.40	0.00	

Tabla 5.3 Datos de precipitación de una estación meteorológica

De la Tabla 5.2, los parámetros de ajuste para le región R2 son los siguientes:

a= 24.85
b= 0.22
c= 0.5
d= 0.1

Y el valor de la Precipitación Máxima Promedio anual en 24 h a nivel multianual es igual a 102.00 mm, tal como se muestra en la Tabla 5.3

La ecuación resultante para el cálculo de la Intensidad en función de los parámetros de ajuste es la siguiente:

$$i = \frac{24.85 \times T^{0.22} \times M^{0.1}}{\frac{t^{0.5}}{60}}$$

0004401 17OCT2017

Aplicando los valores del Periodo de Retorno (T), y la duración (t) se obtiene la Tabla 5.4 con los valores de la Intensidad (i) con los cuales se pueden configurar las curvas I-D-F, tal como se muestra a continuación en la Figura 5.2.

Duración (min)	Período de Retorno (años)					
	2	5	10	20	25	50
10	112.59	137.73	160.42	186.85	196.25	228.58
20	79.61	97.39	113.43	132.12	138.77	161.63
30	65.00	79.52	92.62	107.88	113.30	131.97
40	56.29	68.87	80.21	93.42	98.12	114.29
50	50.35	61.60	71.74	83.56	87.77	102.22
60	45.96	56.23	65.49	76.28	80.12	93.32
70	42.55	52.06	60.63	70.62	74.18	86.39
80	39.81	48.70	56.72	66.06	69.38	80.81
90	37.53	45.91	53.47	62.28	65.42	76.19
100	35.60	43.55	50.73	59.09	62.06	72.28

Tabla 5.4 Valores de la Intensidad (i) en mm/hora calculadas para generar las curva I-D-F

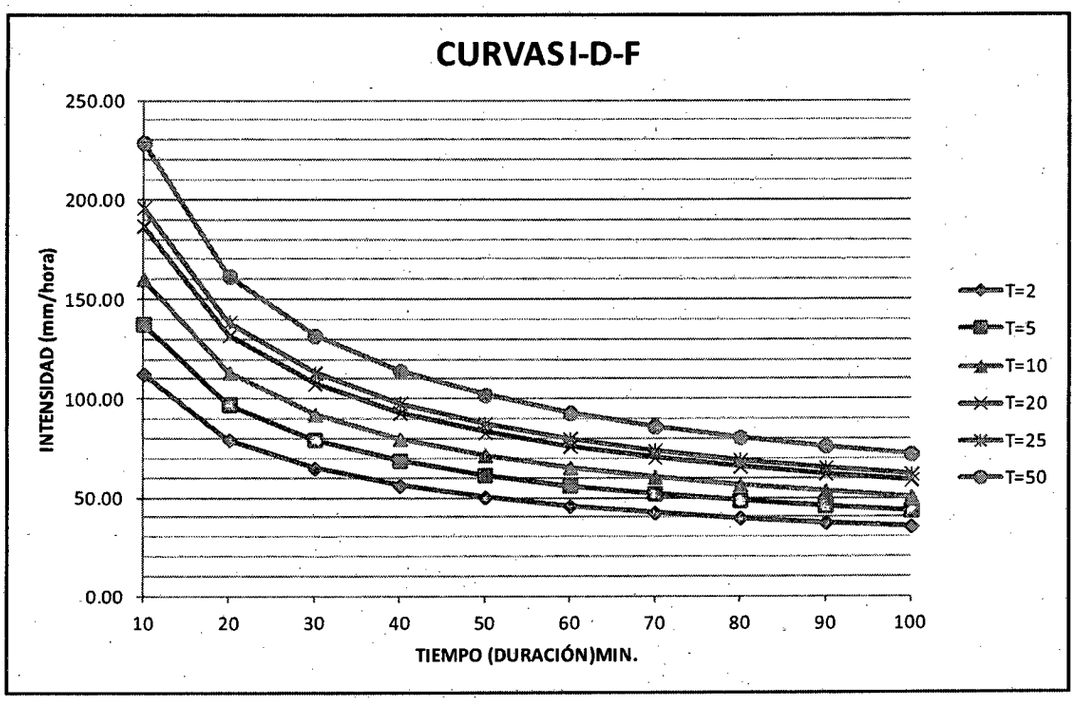


Figura 5.2 Curvas Intensidad-Duración-Frecuencia (Periodo retorno T)

90

0004401 17OCT2017

5.3 Control hidráulico de la berma – cuneta

5.3.1 Berma- cuneta recomendada en la presente Guía

Para el caso del pavimento con placa-huella es necesario recoger las aguas lluvias provenientes de la placa-huella en dos bermas-cunetas ubicadas lateralmente a la estructura. Estas bermas-cunetas adicionalmente sirven de confinamiento de la estructura del pavimento y de anclaje a las riostras que sirven de confinamiento. La forma y las dimensiones adoptadas para la berma-cuneta que se recomienda en la presente Guía permiten que eventualmente la rueda de un vehículo pueda circular por ella con seguridad para permitir el adelantamiento de un vehículo liviano y que el agua proveniente de la superficie de rodadura pueda ser canalizada hasta entregarla a un aliviadero o a una alcantarilla.

La forma y las dimensiones de la berma-cuneta recomendada en la presente Guía se indican en la Figura 5.3

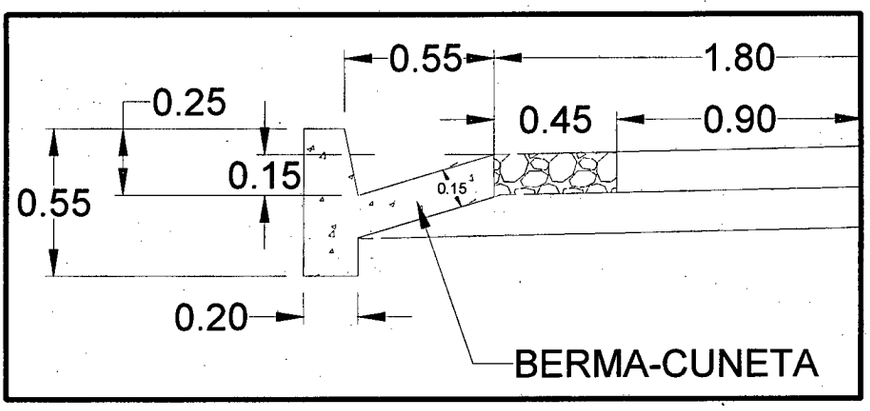


Figura 5.3 Berma-cuneta (recomendada en la presente Guía)

5.3.2 Parámetros adoptados para la berma – cuneta recomendada

La lámina de agua que se forma en la berma-cuneta tipo se muestra en la Figura 5.4.

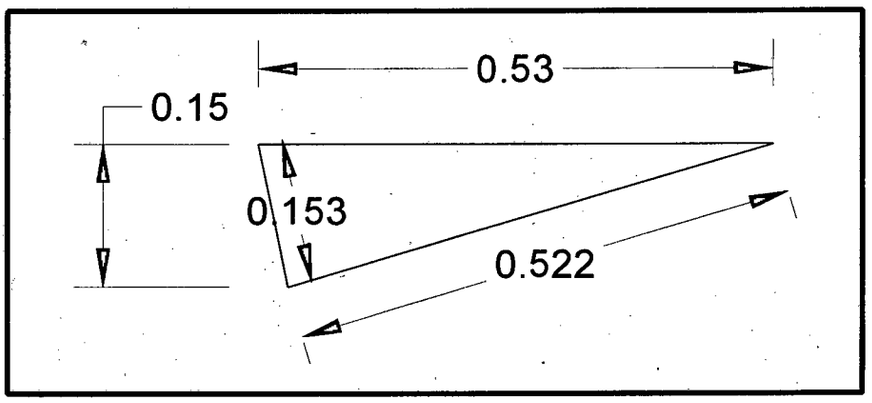


Figura 5.4 Lámina de agua en la berma-cuneta (recomendada en la presente Guía)

0004401 17OCT2017

Profundidad máxima de la lámina de agua = 0.150 m.

Ancho máximo de la lámina de agua = 0.521 m.

Área hidráulica (a) = 0.039 m^2.

Perímetro mojado = 1.195 m.

Radio Hidráulico (R) = 0.0326.

Superficie de la cuneta en concreto.

Coeficiente de Manning (n) = 0.014.

Pendiente de la cuneta igual a la pendiente de la rasante de la vía (S).

Pendiente mínima de la vía = 0.5%.

Pendiente máxima de la vía = 12%.

Intensidad de la lluvia (I) = Valor obtenido la curva I-D-F.

Duración del aguacero (Tiempo de concentración) = 10 minutos.

Periodo de retorno = 5 años.

Coeficiente de escorrentía (Ce) = 0.82, terreno montañoso, tierras cultivadas, suelo arcilloso, según los Valores del coeficiente de escorrentía en áreas rurales del Manual de Drenaje para Carreteras INV-2009-Tabla 2.10

Ancho de Impluvium = 25 m. en terreno montañoso. Este ancho incluye el ancho de superficie de rodadura, ancho de la berma-cuneta, la proyección del talud de corte y un ancho adicional tal como se indica en la Figura 5.5.

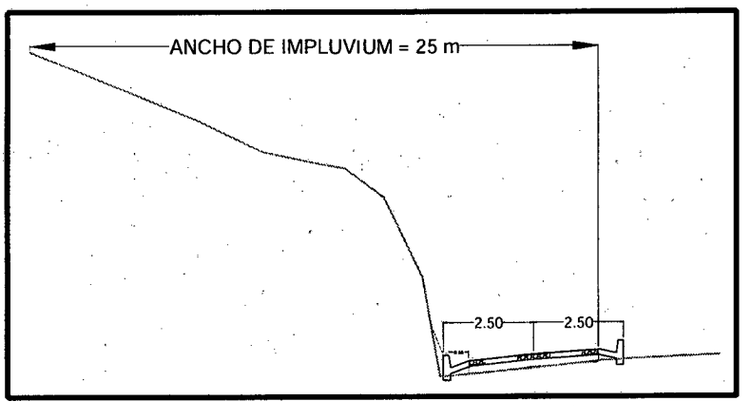


Figura 5.5 Ancho de impluvium

0004401 17OCT2017

5.3.3 Determinación del caudal de demanda dado un espaciamiento entre alcantarillas

El diseño hidráulico de las cunetas es similar al de un canal abierto, aunque estrictamente el caudal de la cuneta es variable y aumenta a medida que aumenta su longitud.

Como el área tributaria es pequeña (< 5 Km^2) se puede utilizar el método racional para encontrar el caudal:

$Qe = 0.280 * C * I * A\gamma$

Qe = Caudal de escorrentía en m^3 / seg.

C = Coeficiente de escorrentía.

I = Intensidad para un tiempo de concentración (mm / Horas).

Tiempo de concentración = 10min.

$A\gamma$ = área aferente o tributaria en Km^2.

$A\gamma = B * L$

El área aferente para las cunetas está forma por el área dada por el ancho impluvium (B) y la longitud de la cuneta (L).

5.3.4 Determinación del caudal que puede transportar la Berma-cuneta tipo

El caudal que puede transportar la berma-cuneta tipo a sección plena, dada una pendiente longitudinal de la vía, se puede encontrar mediante la aplicación de la Ecuación de continuidad y la Fórmula de Manning.

$Qc = V * a$ (Ecuación de continuidad)

$V = 1/n * S^{1/2} * R^{2/3}$ (Fórmula de Manning)

Donde:

Qc = Caudal que puede transportar la berma-cuneta en m^3 / seg.

V = Velocidad del agua que circula por la berma-cuneta, en m / seg.

R = Radio Hidráulico en metros.

S = Pendiente de la berma-cuneta en tanto por uno, igual a la pendiente de la rasante de la vía.

n = coeficiente de rugosidad de Manning.

a = Área hidráulica de la sección transversal de la berma-cuneta, en m^2.

93

0004401 17OCT2017

5.3.5 Criterios de diseño

- El caso más desfavorable se presenta en las curvas horizontales donde hay peralte y toda la calzada drena hacía la cuneta y simultáneamente se presenta una sección transversal en corte.

- El diseño hidráulico consiste en chequear la capacidad de la berma-cuneta, con el caudal de escorrentía. Es decir, equilibrar Qe = Qc, para encontrar una longitud (L) de berma-cuneta.

- De la igualdad Qe = Qc se obtiene un valor de L, magnitud que indica el sitio donde se rebosa la cuneta y donde es necesario desviar el agua mediante un aliviadero o una alcantarilla. La expresión para el cálculo de L deducida de la igualdad Qe = Qc es:

$$L = \frac{R^{\frac{2}{3}} * S^{\frac{1}{2}} * a * 10^{6}}{0.280 * n * C_{e} * I * A\gamma}$$

Con la anterior expresión se calculan las longitudes de la berma-cuneta para diferentes valores de pendiente de la rasante (S), valores que se indican en la Tabla 5.5.

- La berma-cuneta propuesta de una longitud (L), debe chequearse contra la acción erosiva del agua, aunque al ser construida en concreto la erosión solo se producirá cuando la velocidad del agua supere los 3 m/seg. La erosión se presentará en longitudes muy largas con fuertes pendientes, longitudes que son superiores a las longitudes (L) de rebosamiento. En conclusión la cuneta primero se rebosa y luego se erosiona y en el sitio de rebosamiento se ubica un aliviadero o una alcantarilla para la evacuación del agua de la berma-cuneta.

- Se considera un ancho de Impluvium (B) igual a 25 m definido para una vía en terreno montañoso, que es la condición más desfavorable, donde se presenta una mayor área tributaria hacia la berma-cuneta.

5.3.6 Familia de curvas I-P-L

Aplicando los anteriores criterios de diseño se elaboran las curvas I-P-L donde a partir de la Intensidad y la pendiente longitudinal de la vía se puede se determina la Longitud máxima de la cuneta de un tramo de vía en estudio. En la Tabla 5.5 se indican los valores para organizar las curvas I-P-L y en las Figuras 5.6 y 5.7 se presentan las correspondientes curvas.

0004401 17OCT2017

	LONGITUDES MAXIMAS DE CUNETAS EN METROS (CONTROL DE REBOSAMIENTO)												
	PENDIENTE LONGITUDINAL DE LA VÍA (%)												
INTENDIDAD (MM/H)	0.5	1.0	2.0	3.0	4.0	5.0	6.0	7.0	8.0	9.0	10.0	11.0	12.0
50	70.0	99.1	140.1	171.6	198.1	221.5	242.6	262.1	280.2	297.2	313.2	328.5	343.1
60	58.4	82.5	116.7	143.0	165.1	184.6	202.2	218.4	233.5	247.6	261.0	273.8	285.9
70	50.0	70.8	100.1	122.5	141.5	158.2	173.3	187.2	200.1	212.3	223.7	234.7	245.1
80	43.8	61.9	87.6	107.2	123.8	138.4	151.6	163.8	175.1	185.7	195.8	205.3	214.5
90	38.9	55.0	77.8	95.3	110.1	123.0	134.8	145.6	155.6	165.1	174.0	182.5	190.6
100	35.0	49.5	70.0	85.8	99.1	110.7	121.3	131.0	140.1	148.6	156.6	164.3	171.6
110	31.8	45.0	63.7	78.0	90.0	100.7	110.3	119.1	127.3	135.1	142.4	149.3	156.0
120	29.2	41.3	58.4	71.5	82.5	92.3	101.1	109.2	116.7	123.8	130.5	136.9	143.0
130	26.9	38.1	53.9	66.0	76.2	85.2	93.3	100.8	107.8	114.3	120.5	126.4	132.0
140	25.0	35.4	50.0	61.3	70.8	79.1	86.7	93.6	100.1	106.1	111.9	117.3	122.5
150	23.3	33.0	46.7	57.2	66.0	73.8	80.9	87.4	93.4	99.1	104.4	109.5	114.4
160	21.9	31.0	43.8	53.6	61.9	69.2	75.8	81.9	87.6	92.9	97.9	102.7	107.2
170	20.6	29.1	41.2	50.5	58.3	65.1	71.4	77.1	82.4	87.4	92.1	96.6	100.9
180	19.5	27.5	38.9	47.7	55.0	61.5	67.4	72.8	77.8	82.5	87.0	91.3	95.3
190	18.4	26.1	36.9	45.1	52.1	58.3	63.8	69.0	73.7	78.2	82.4	86.5	90.3
200	17.5	24.8	35.0	42.9	49.5	55.4	60.7	65.5	70.0	74.3	78.3	82.1	85.8

Tabla 5.5 Valores calculados para el dibujo de las curvas I-P-L

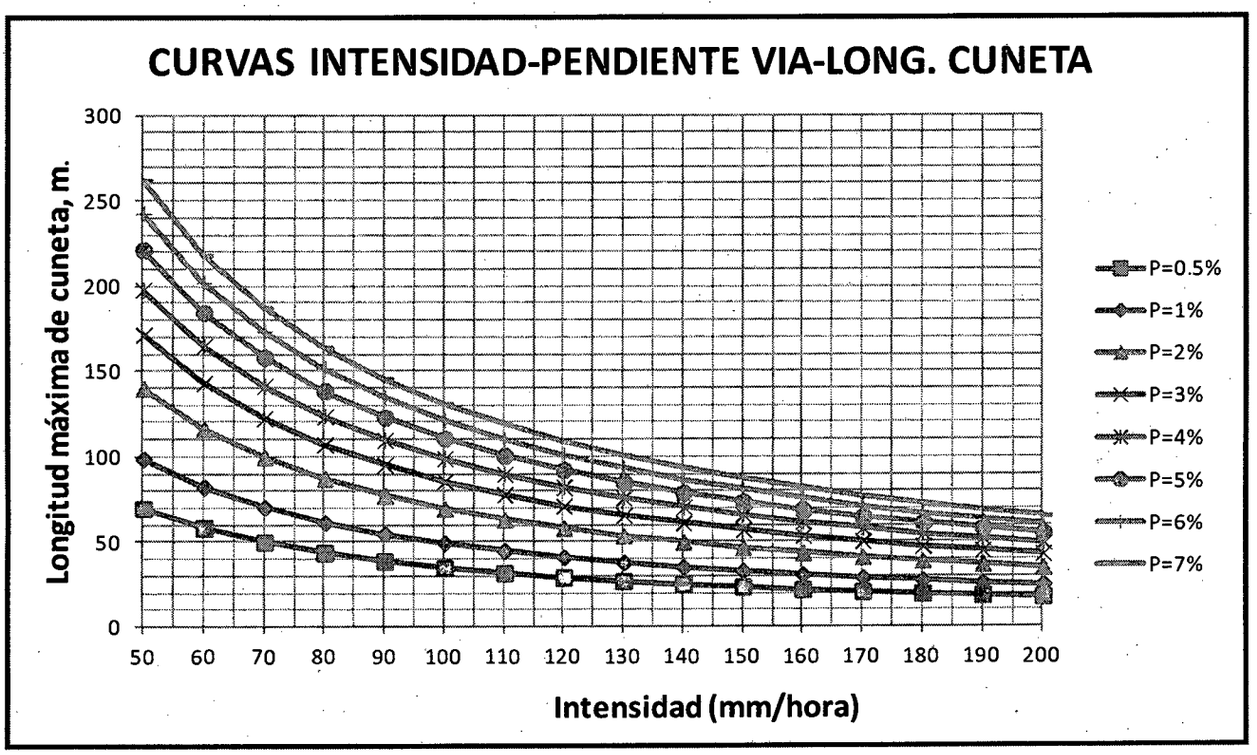


Figura 5.6 Curvas I-P-L para pendientes de vía de 0.5% a 7%

95

0004401 17OCT2017

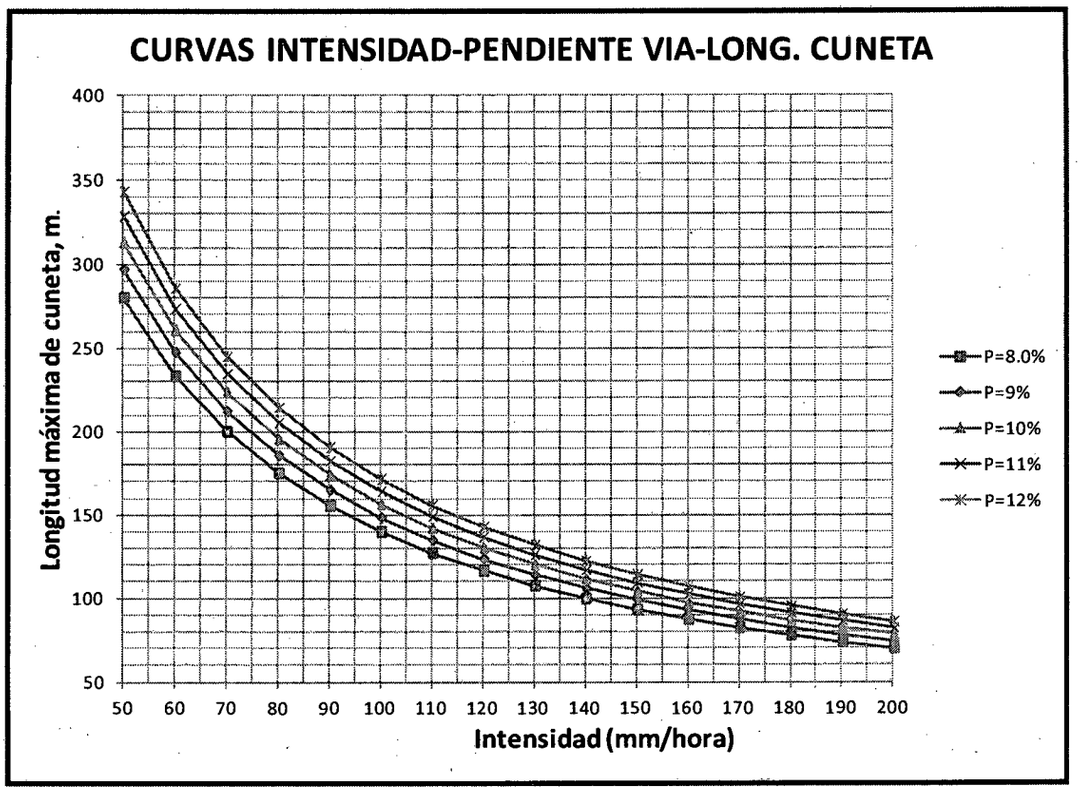


Figura 5.7 Curvas I-P-L para pendientes de vía de 8.0% a 12%

5.3.7 Ejemplo de aplicación

Determinar la longitud (L) de la berma-cuneta tipo a la cual se produce el rebosamiento y es necesario desviar el agua mediante un aliviadero o una alcantarilla.

Datos:

Utilizar las curvas I-D-F del ejemplo indicado en el numeral 5.2.3 para definir el valor de la Intensidad en mm/hora.

Pendiente de la rasante de la vía en tramo en estudio P= 5%

Período de retorno = 5 años, tiempo de duración de la lluvia = 10 min.

Cálculos:

En la Figura 5.2 curvas I-D-F, para el ejemplo propuesto, para una duración de la lluvia de 10 min. y un periodo de retorno = 5 años (Ver Tabla 5.1),se obtiene la Intensidad igual a 138 mm/hora.

En la Tabla 5.5 o en la Figura 5.6 Curvas I-P-L, con los valores de I = 138 mm/hora y P=5% se obtiene una la longitud de la berma-cuneta igual a 80 m., lo cual indica que a los 80 metros a partir del inicio de la

96

0004401 17OCT2017

berma-cuneta es necesario desviar el agua mediante un aliviadero o con una alcantarilla.

5.4 Ubicación de las alcantarillas

5.4.1 Identificación de la abscisas donde se inicia y finaliza las cunetas

Para determinar los sitios donde inicia y finaliza las cunetas es necesario estudiar el diseño de la rasante de la vía, para definir en el tramo en estudio, la pendiente longitudinal de la vía, el sitio más alto y el más bajo de la rasante.

El punto donde se inicia el llenado de la cuneta o sitio más alto de la cuneta, puede ser el final de un tramo anterior de cuneta o el punto más alto de una curva vertical convexa.

El punto donde es necesario evacuar el agua de las cunetas o sitio más bajo de la cuneta, puede ser el sitio donde se presenta el rebosamiento o el punto más bajo de una curva vertical cóncava donde hay un cambio de pendiente (descenso - ascenso).

El sitio de rebosamiento de la cuneta se determina midiendo la distancia L desde punto donde se inicia el llenado de la cuneta hasta el final de la longitud máxima de cuneta (L). La distancia L se obtiene en las curvas I-P-L, Figuras 5.6 o 5.7. Al final del tramo dado por la distancia L es necesario ubicar una alcantarilla o un aliviadero. Si la longitud L termina dentro de una curva horizontal es conveniente colocar la alcantarilla antes de la curva horizontal donde se inicia la transición de peralte de la curva, con el fin de evitar que el cabezal de la alcantarilla por el lado interior de la curva sea un factor de colisión de un vehículo que circule por la curva horizontal.

En el caso de que en el tramo dado por la distancia L se presente una curva vertical cóncava, se ubica una alcantarilla en el punto más bajo de la curva cóncava para evacuar el agua de las cunetas que confluyen en éste. Igualmente si dentro de la distancia L hay un cruce de flujo de agua permanente (quebrada, río) o temporal (hondonada por donde circula agua en épocas de lluvia), el agua de la cuneta se evacua hacia la obra de cruce (Puente, pontón, box-culvert, alcantarilla) ubicada en este sitio.

5.4.2 Selección de sitios de cruce de flujos de agua permanentes

Para seleccionar los sitios de cruce de flujos de agua permanentes es necesario el estudio de la cartografía de la zona del proyecto (Planos de restitución IGAC), donde se indiquen las curvas de nivel, la red de drenaje y la ubicación del trazado de la vía en estudio. Sobre la cartografía se definen las áreas aferentes o áreas tributarias de los flujos de agua permanentes que son cruzados por el proyecto para determinar el tipo y dimensiones las obras de drenaje necesarias para facilitar el cruce de las aguas, teniendo en cuenta las consideraciones hidrológicas e hidráulicas en las diferentes cuencas.

En terrenos plano y para mayor certeza, se recomienda hacer una inspección en el terreno para consultar a los habitantes de la zona en estudio, las rutas potenciales de los flujos de agua en los valles (ríos, quebradas, sitios de almacenamientos de aguas lluvias).

Esta información debe ser concordante con la ubicación de los cruces de agua permanente obtenidos en el levantamiento topográfico del proyecto con el fin de ubicar y seleccionar correctamente la obra de drenaje correspondiente.

0004401 17OCT2017

5.4.3 Localización de las alcantarillas

De acuerdo a lo indicado en los numerales 5.1 y 5.2 las alcantarillas se ubican en los siguientes sitios:

Al final de la longitud máxima de cuneta (L).

En el punto más bajo de una curva vertical cóncava donde hay un cambio de pendiente (descenso - ascenso).

Prioritariamente en los cruces de aguas permanentes de acuerdo a los estudios hidrológico e hidráulico.

En el cruce de flujo de agua en hondonadas donde potencialmente se presenta paso de agua en épocas de lluvia.

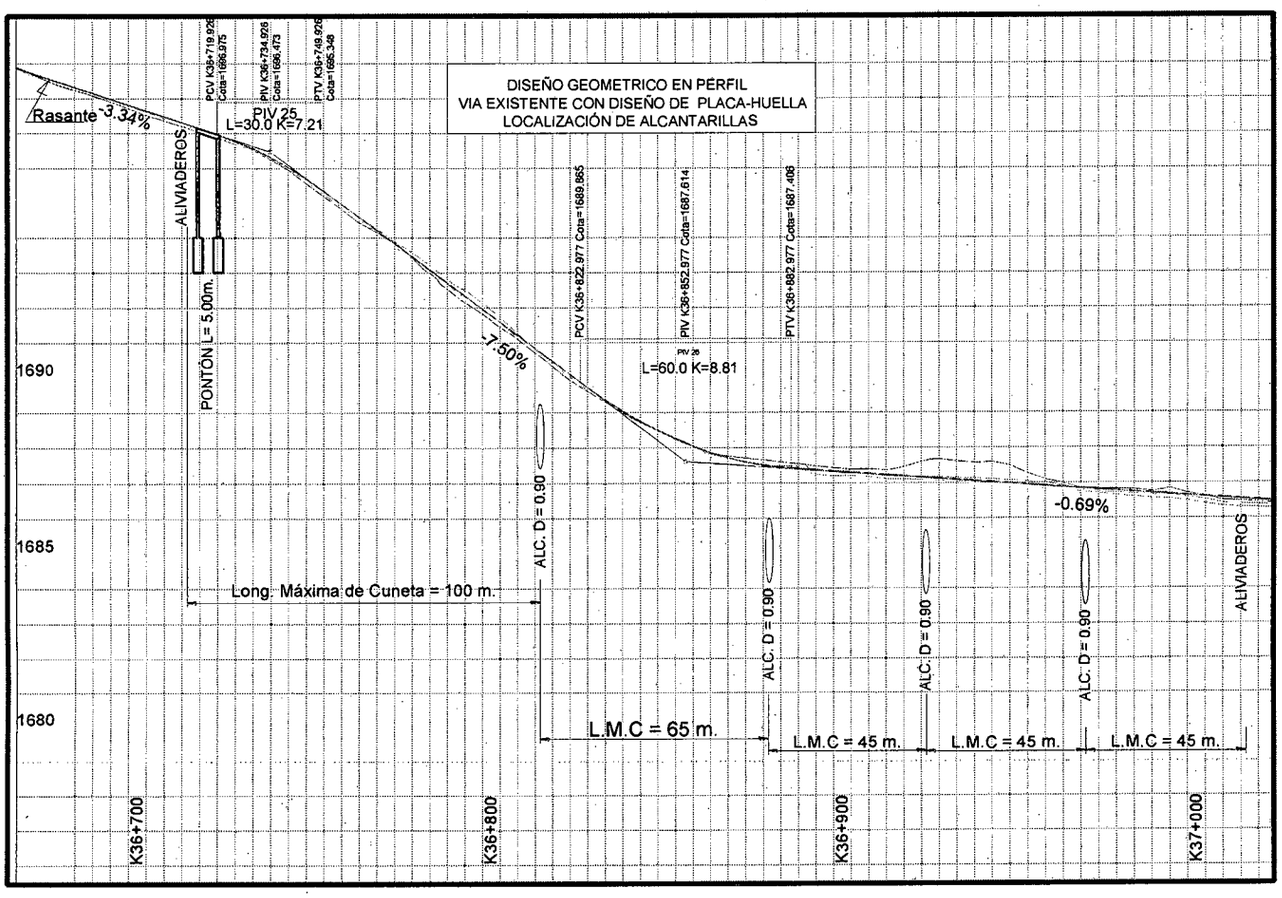


Figura 5.8 Ejemplo de localización de alcantarillas

0004401 17OCT2017

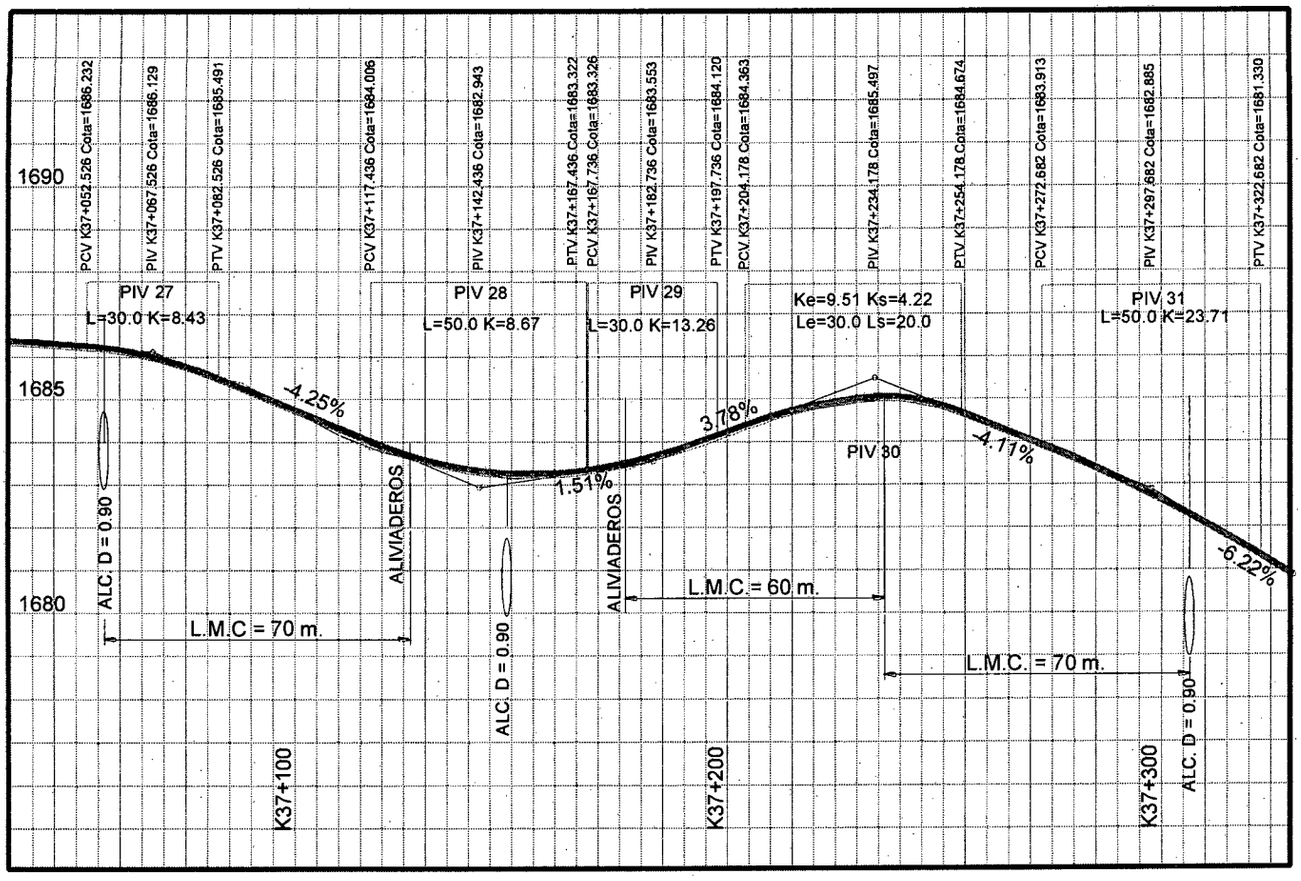


Figura 5.9 Ejemplo de localización de alcantarillas

5.5 Alcantarilla tipo

Mirar siguiente página.

0004401 17OCT2017

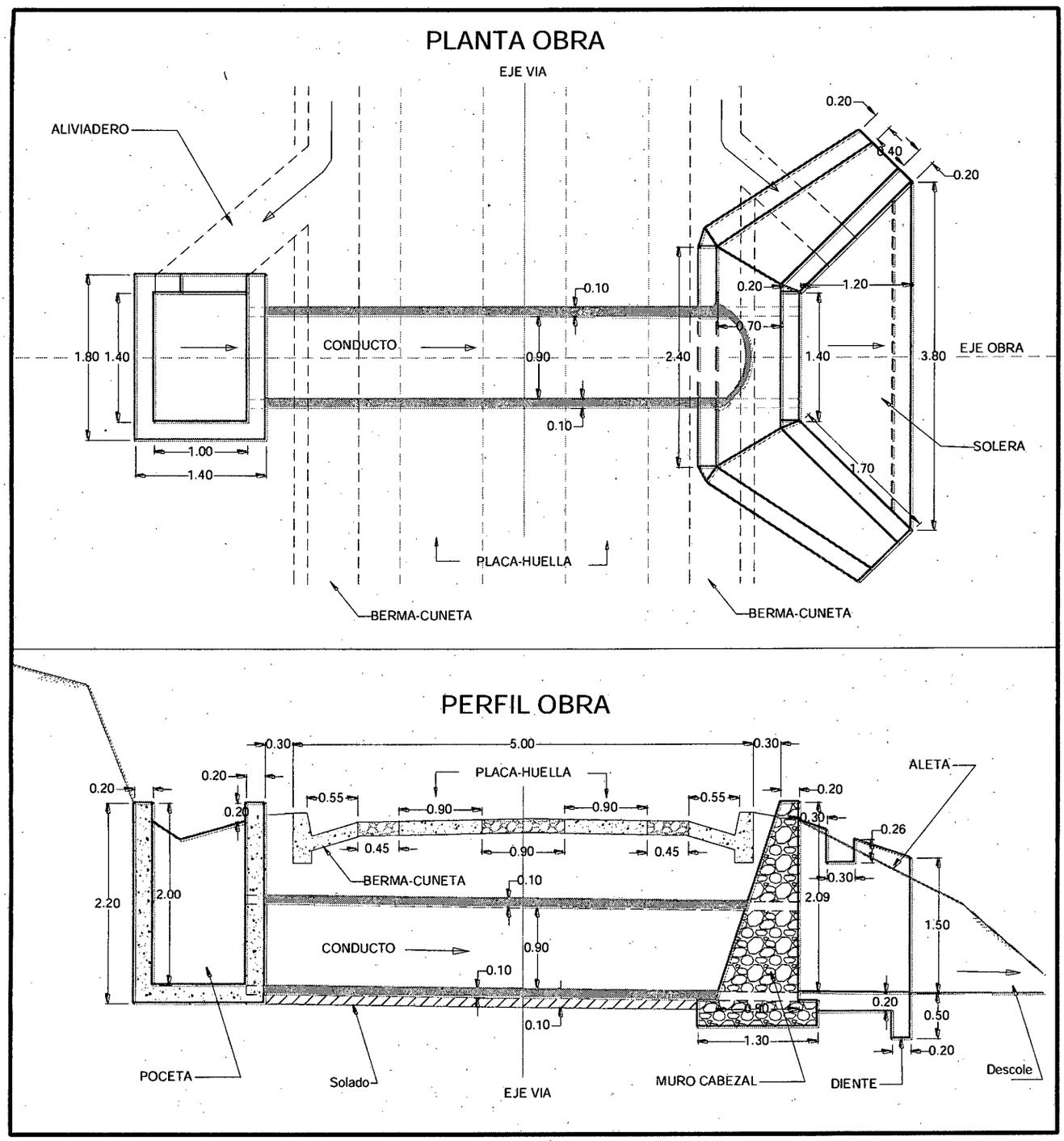


Figura 5.10 Planta y perfil de la alcantarilla típica

0004401 17OCT2017

5.6 Aliviadero tipo y su ubicación

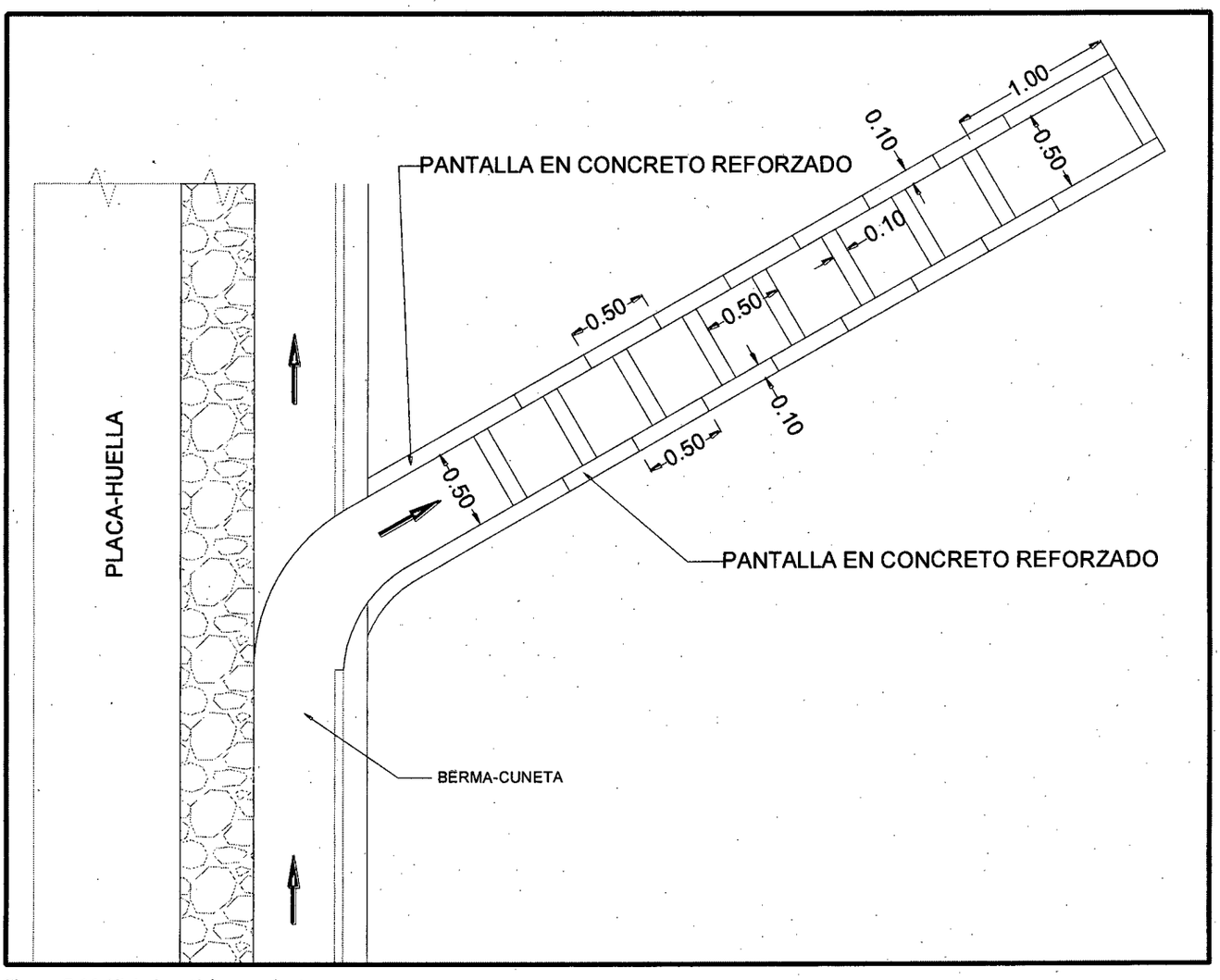


Figura 5.11 Aliviadero típico en planta

0004401 170CT2017

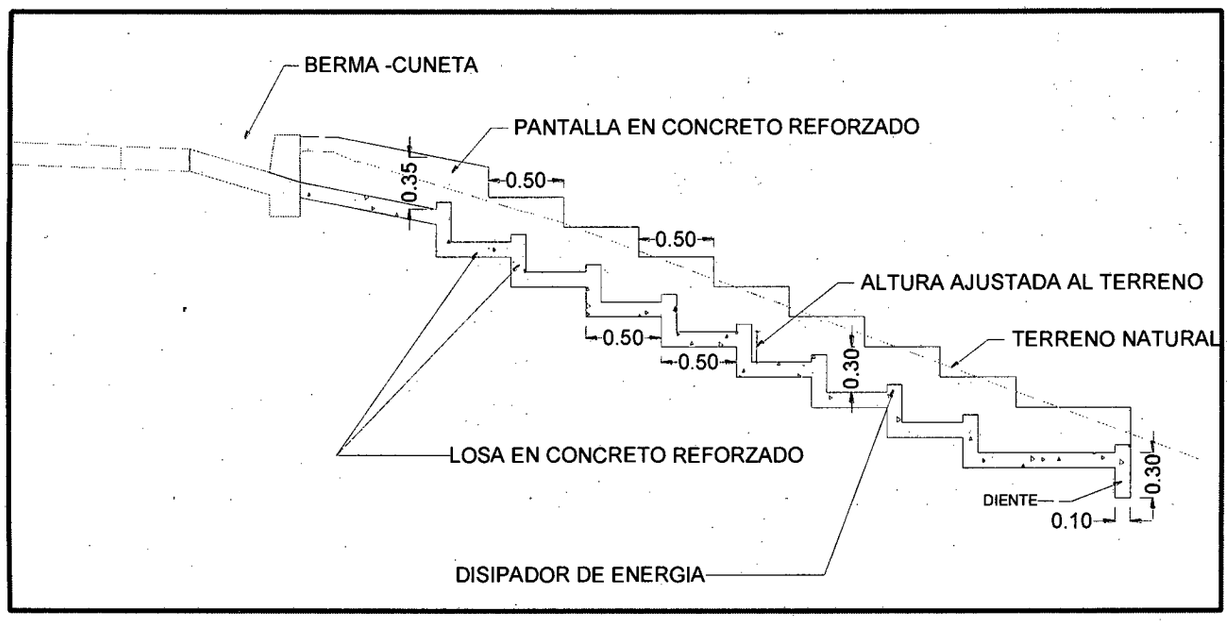


Figura 5.12 Aliviadero típico en perfil

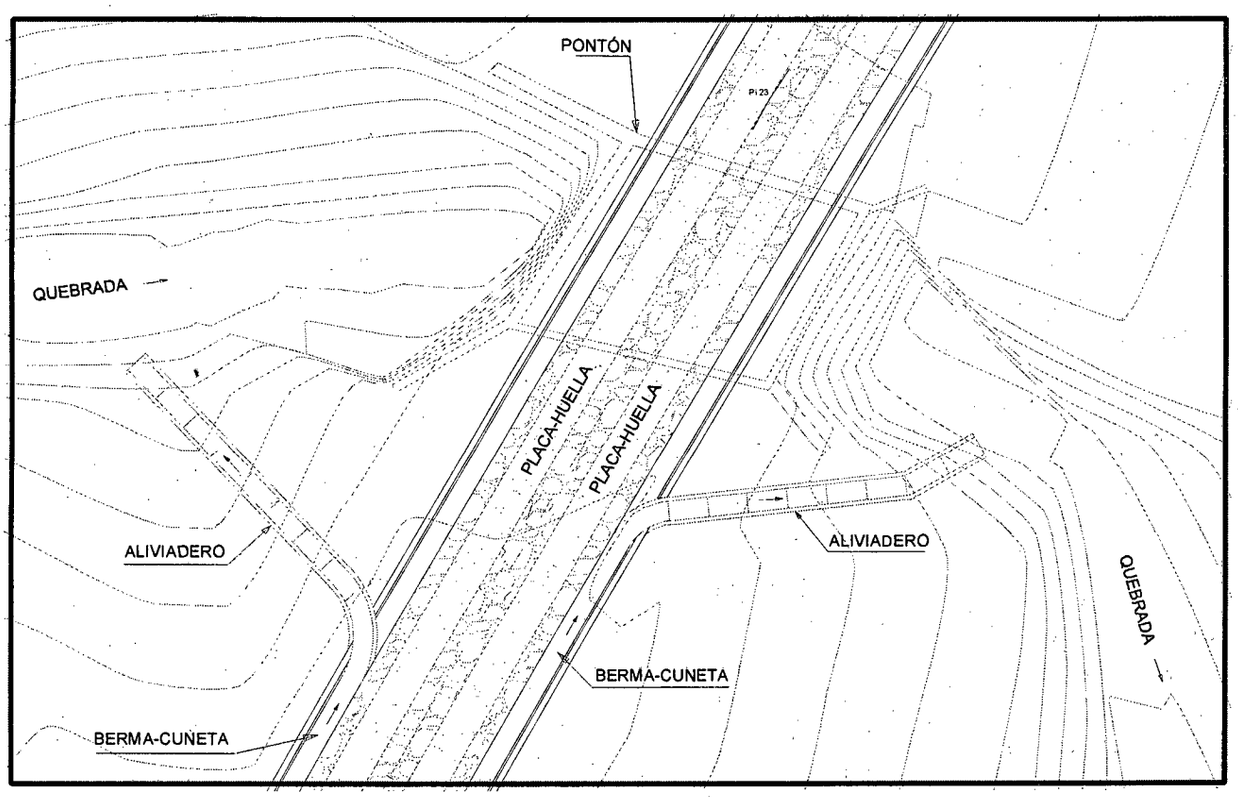
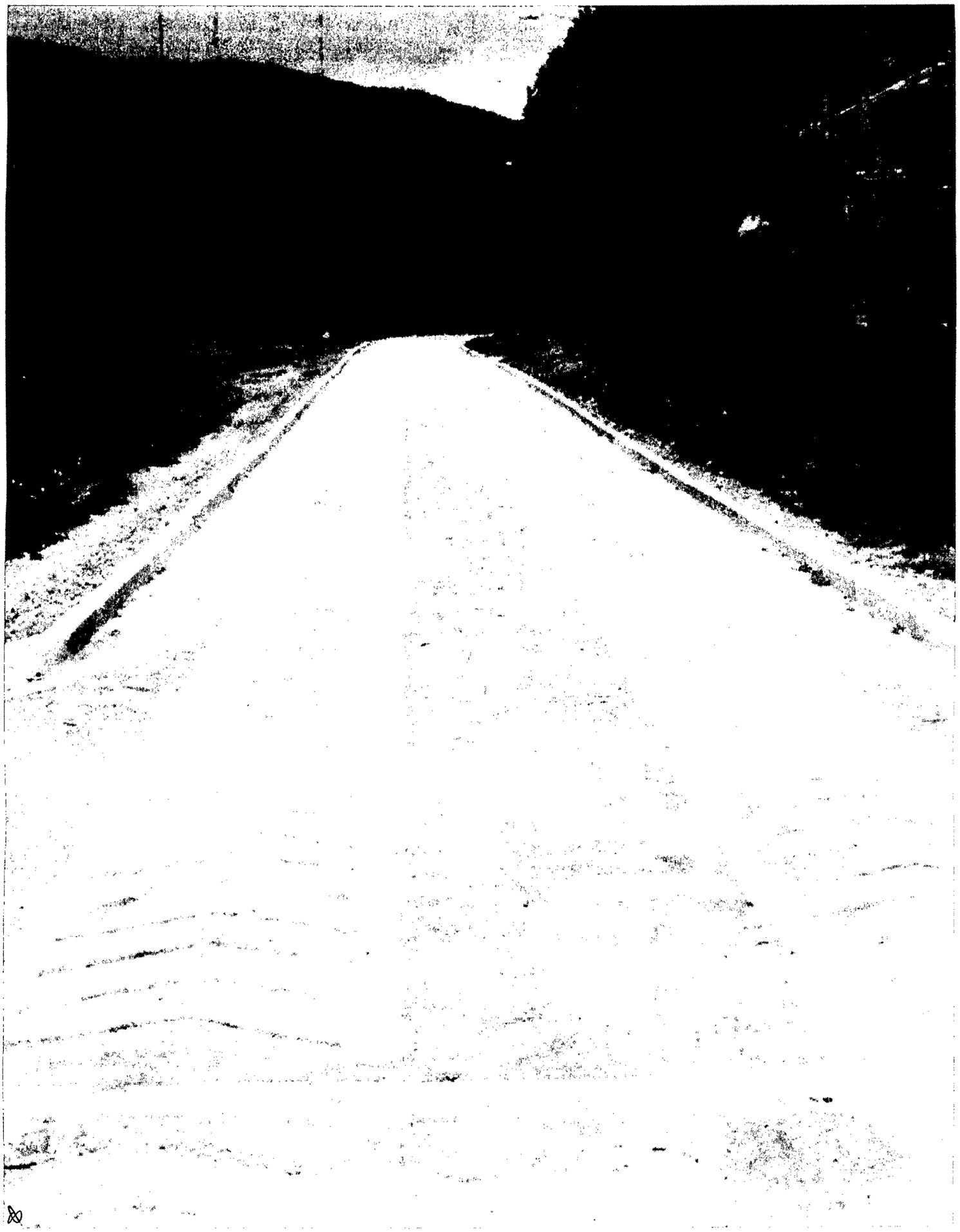
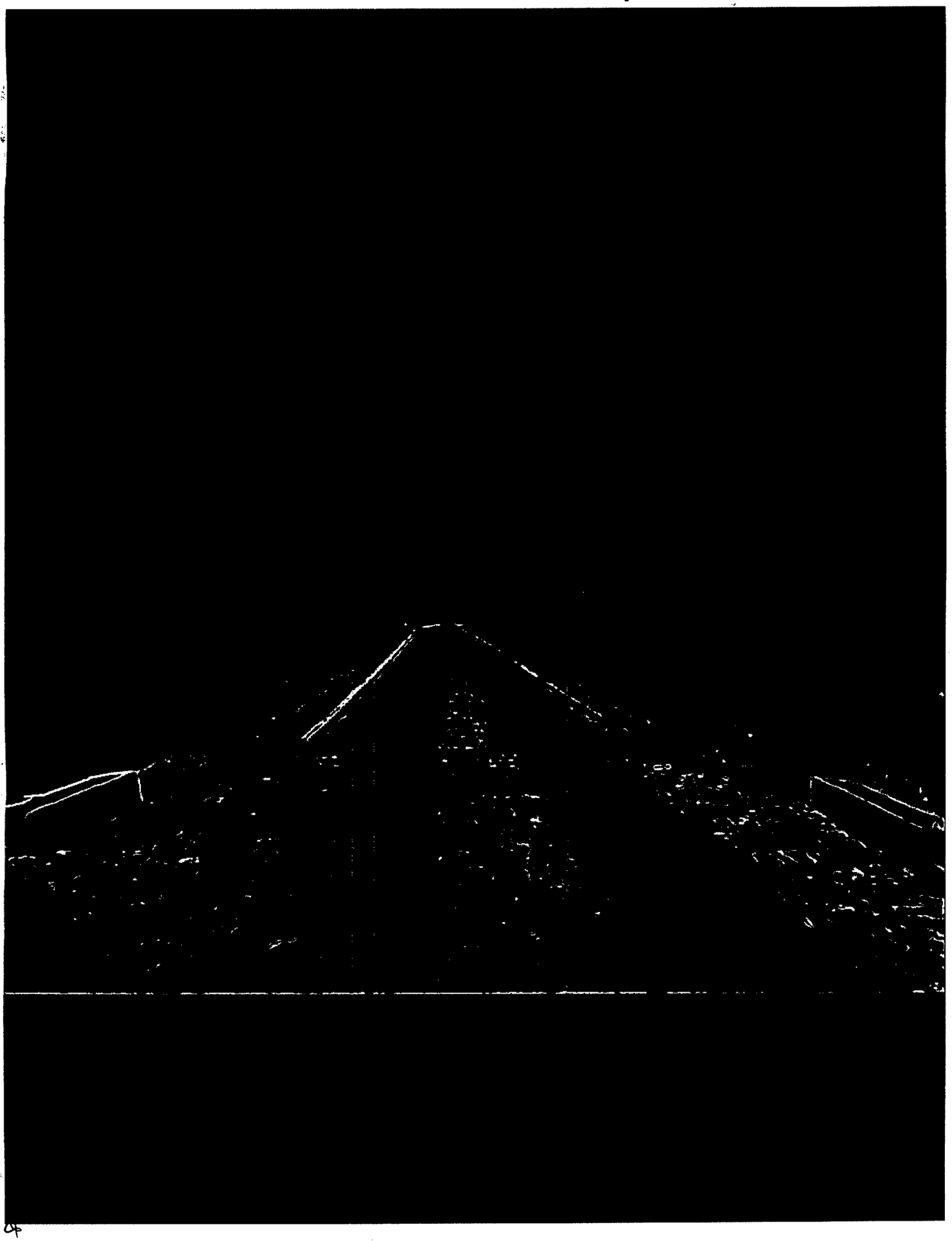


Figura 5.13 Localización de los aliviaderos

0004401 17OCT2017



0004401 17OCT2017



104

0004401 17OCT2017

ANEXO 1

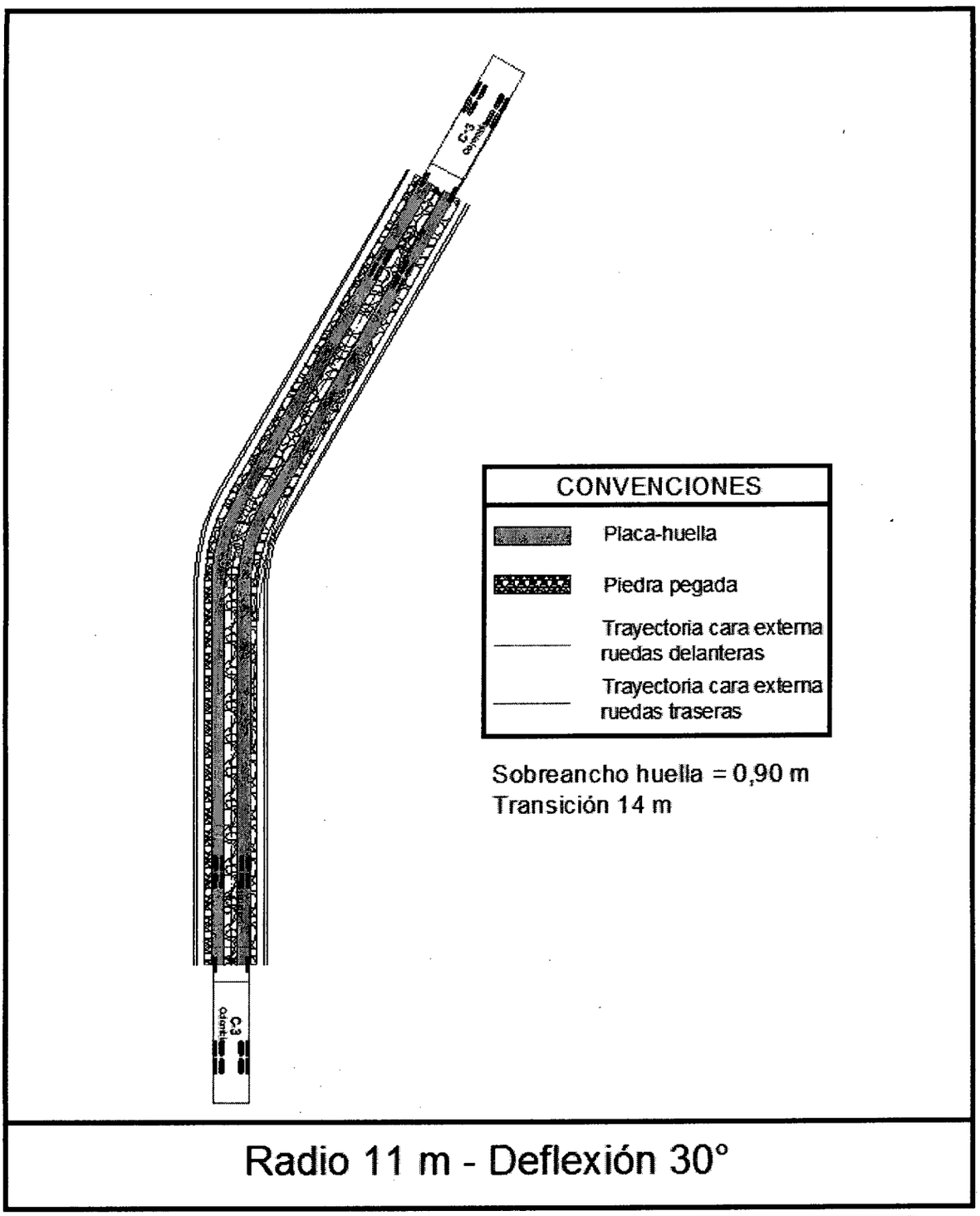
EL VALOR DEL SOBREANCHO EN LAS CURVAS Y SU TRANSICIÓN

Por

José Fernando Sánchez

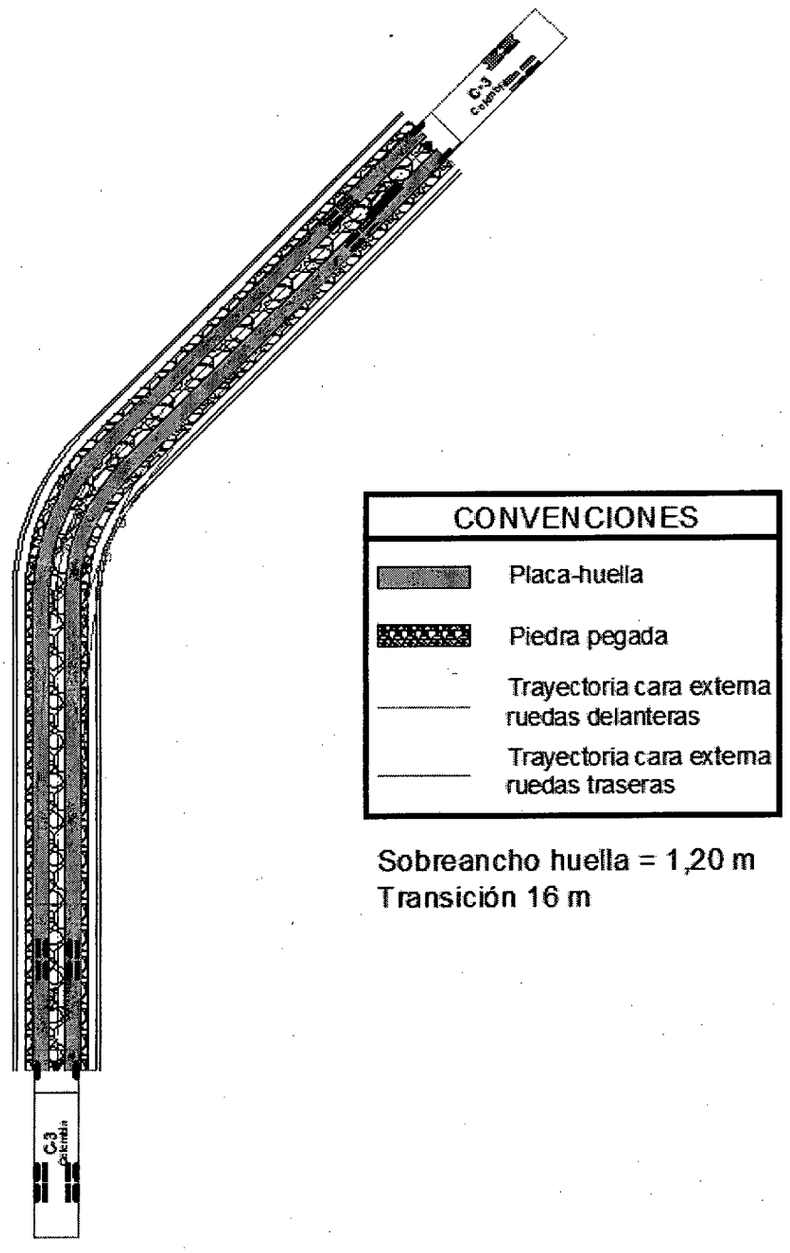
FEBRERO 2016

0004401 17 OCT 2017



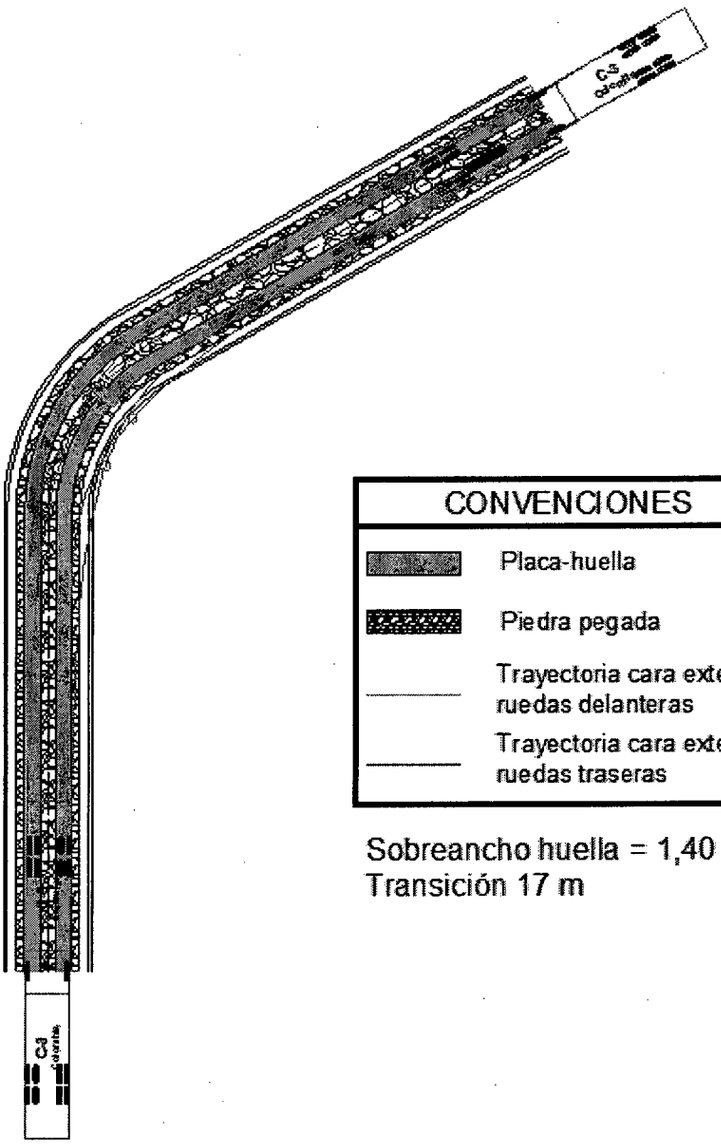
Radio 11 m - Deflexión 30°

0004401 17OCT2017



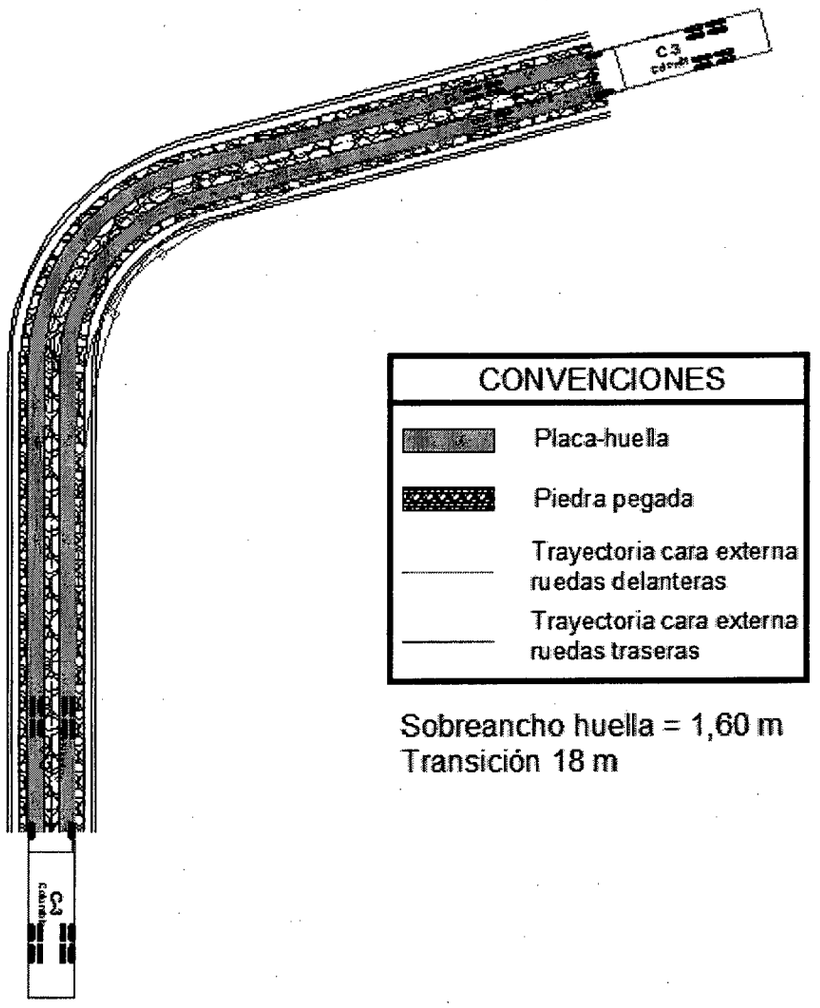
Radio 11 m - Deflexión 45°

0004401 17 OCT 2017



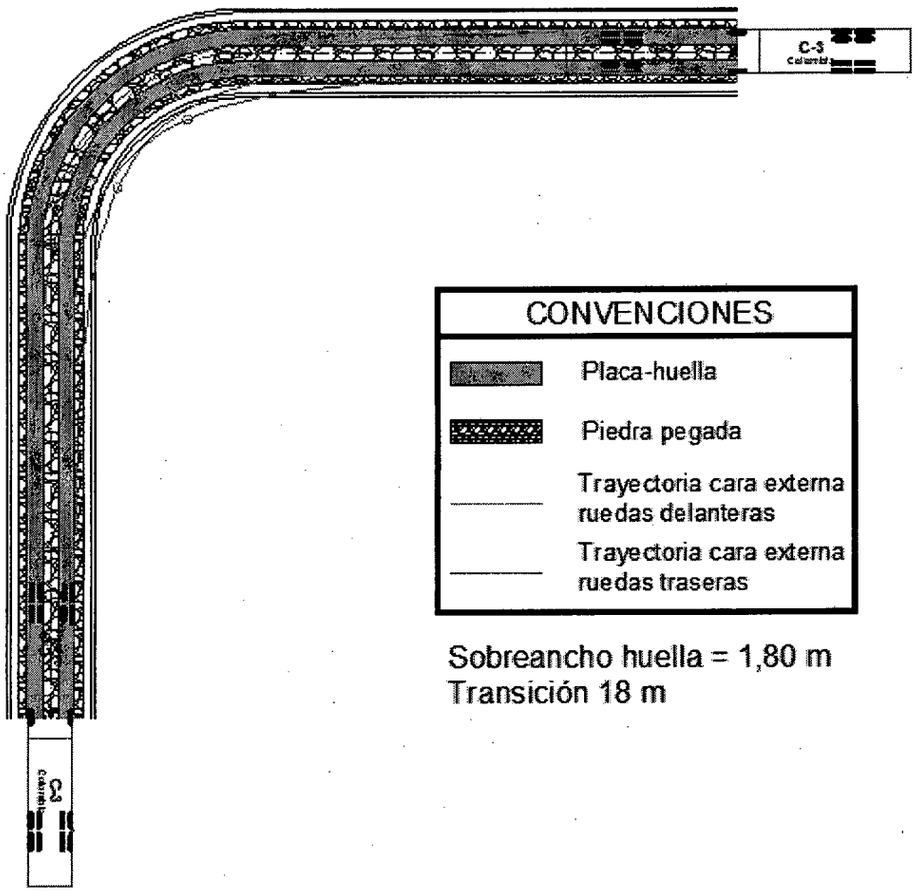
Radio 11 m - Deflexión 60°

0004401 17OCT2017

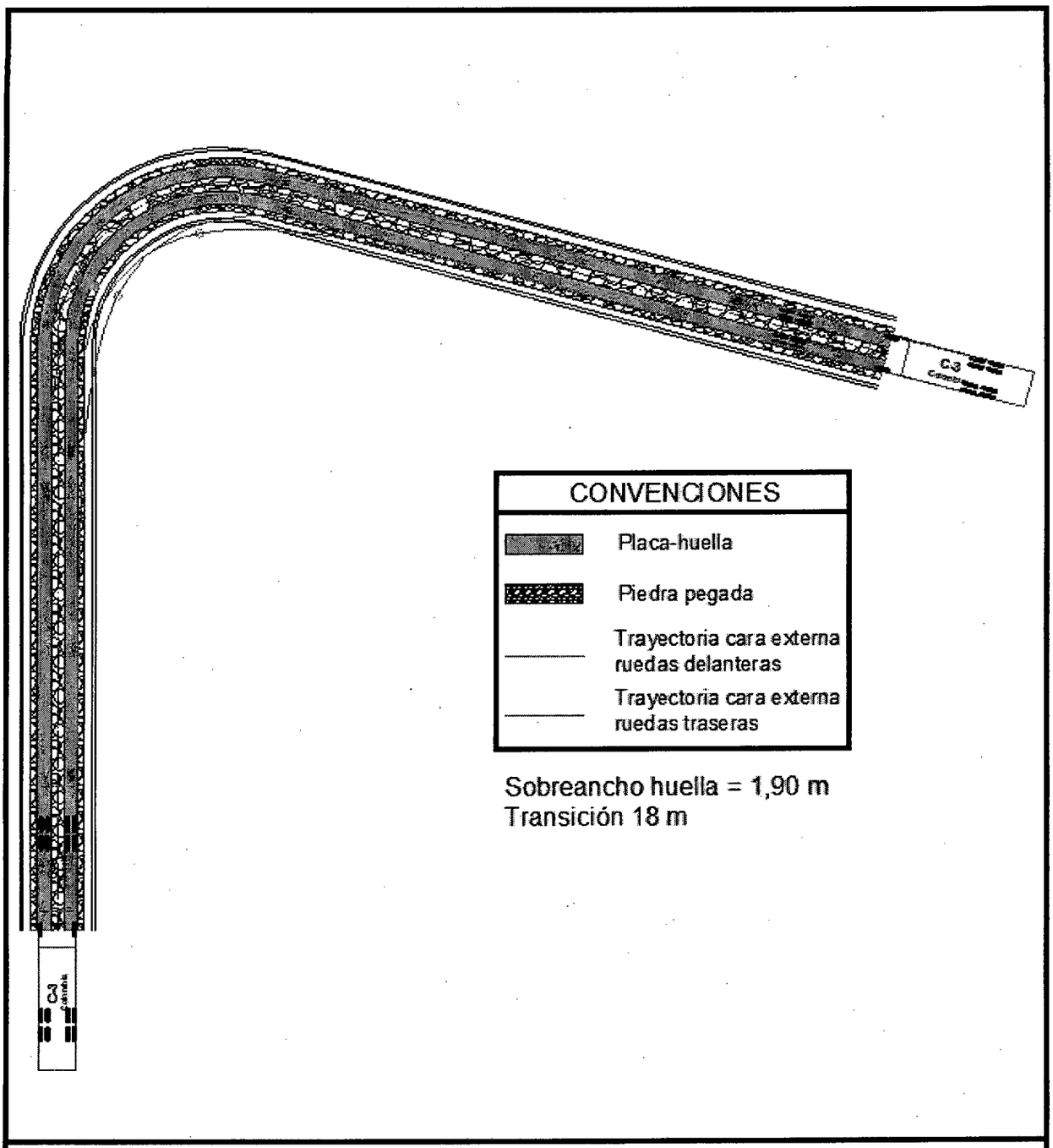


Radio 11 m - Deflexión 75°

0004401 17 OCT 2017

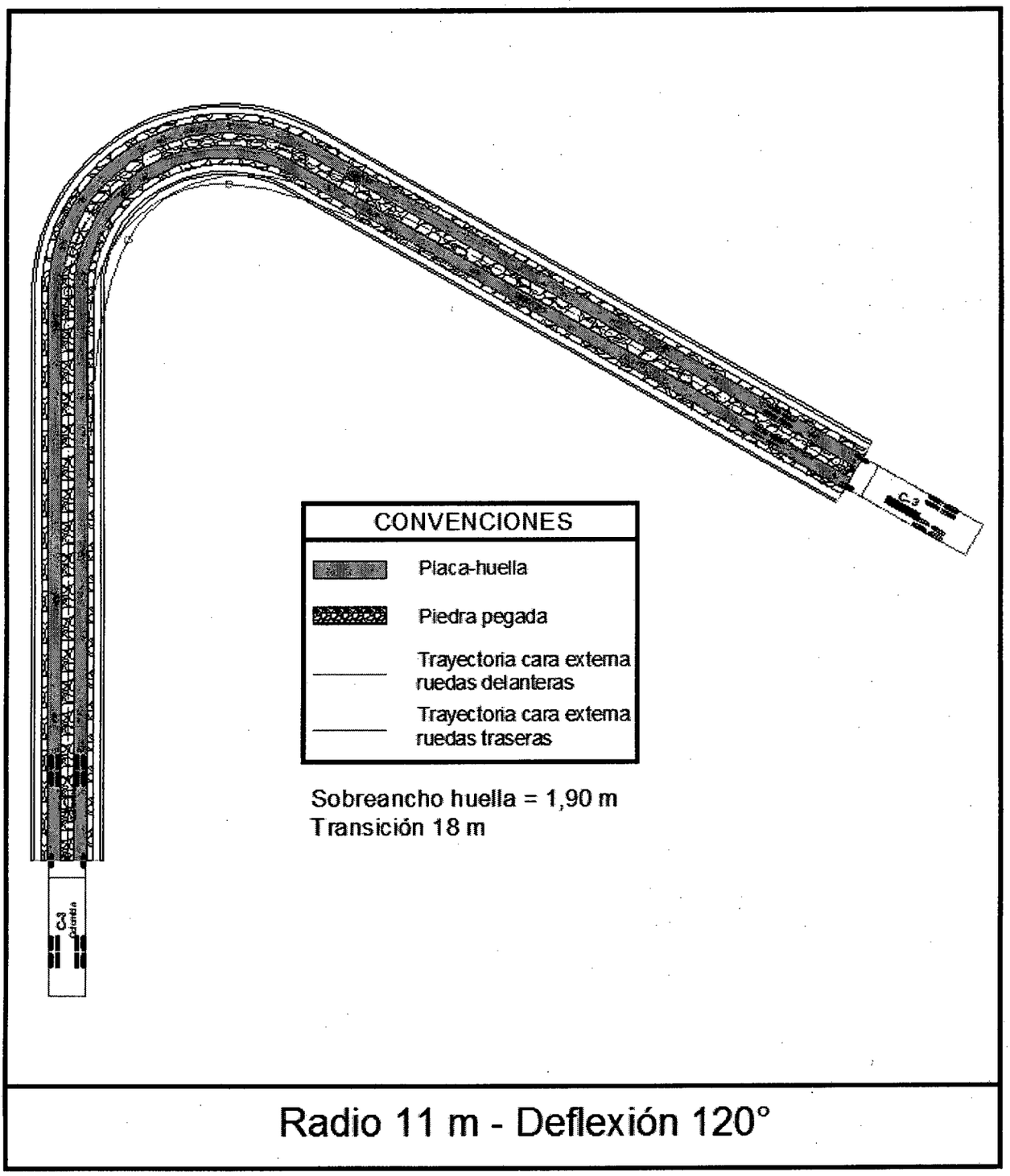


Radio 11 m - Deflexión 90°



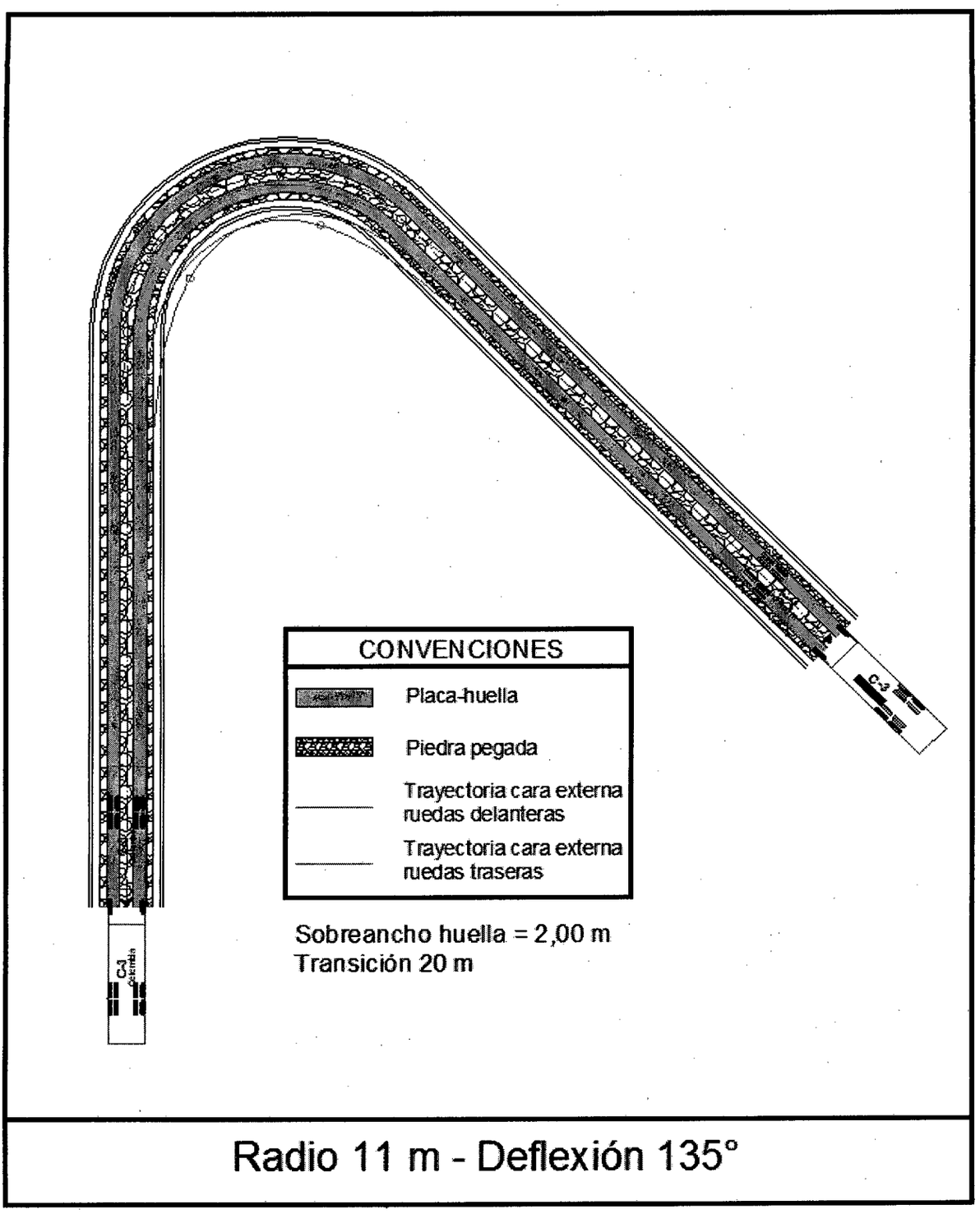
Radio 11 m - Deflexión 105°

0004401 17 OCT 2017



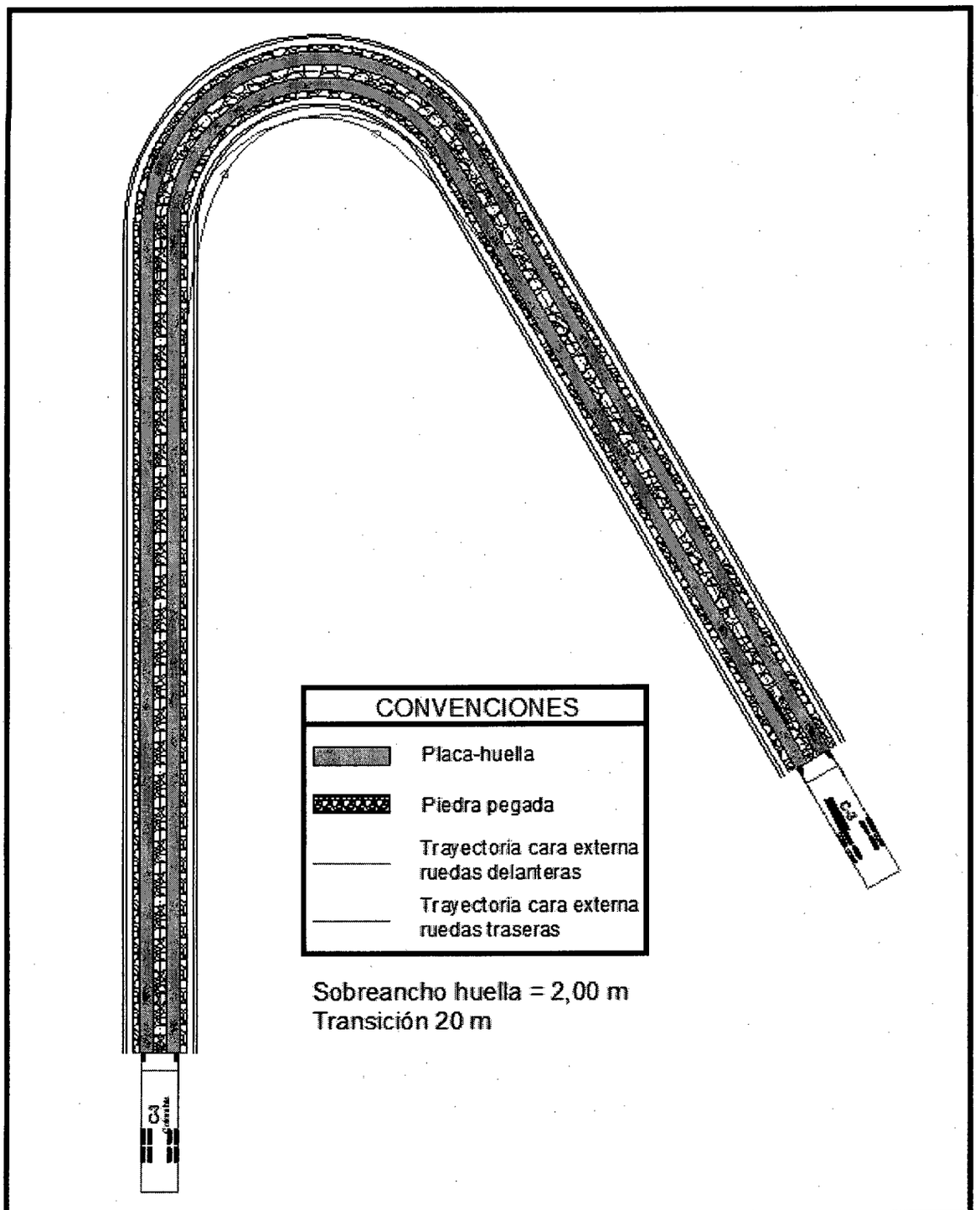
Radio 11 m - Deflexión 120°

0004401 17OCT2017



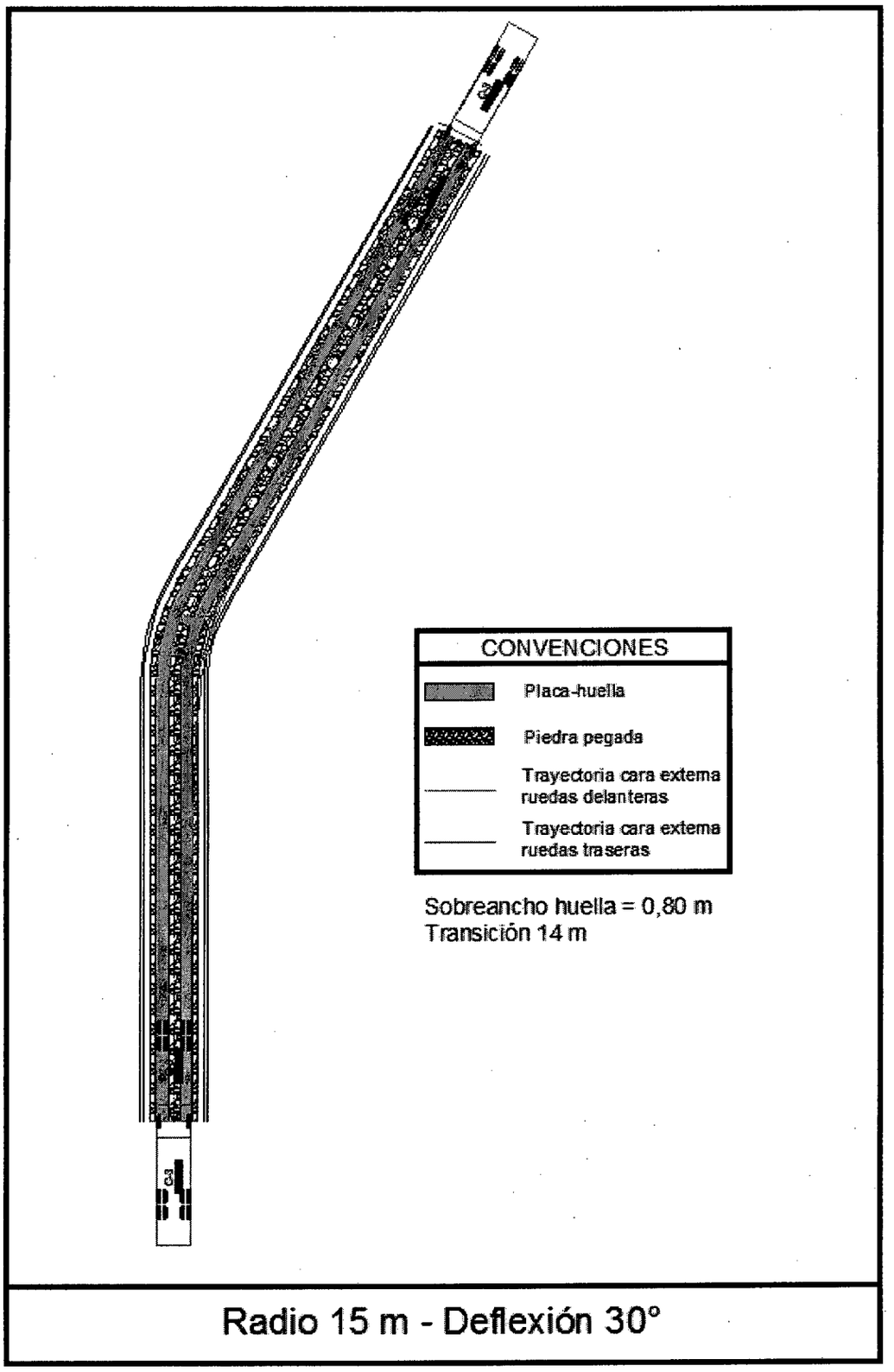
Radio 11 m - Deflexión 135°

0004401 17 OCT 2017



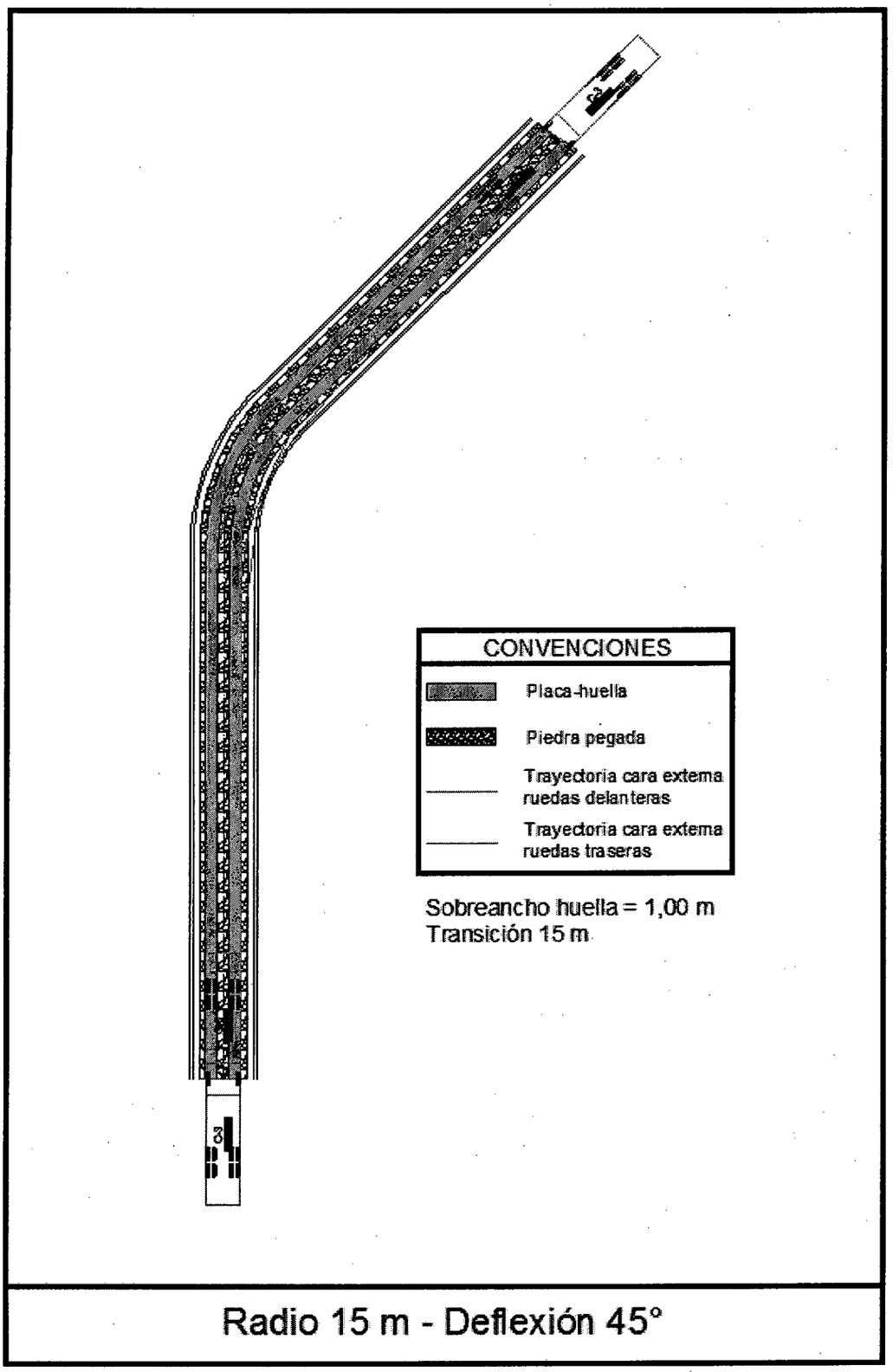
Radio 11 m - Deflexión 150°

0004401 17 OCT 2017



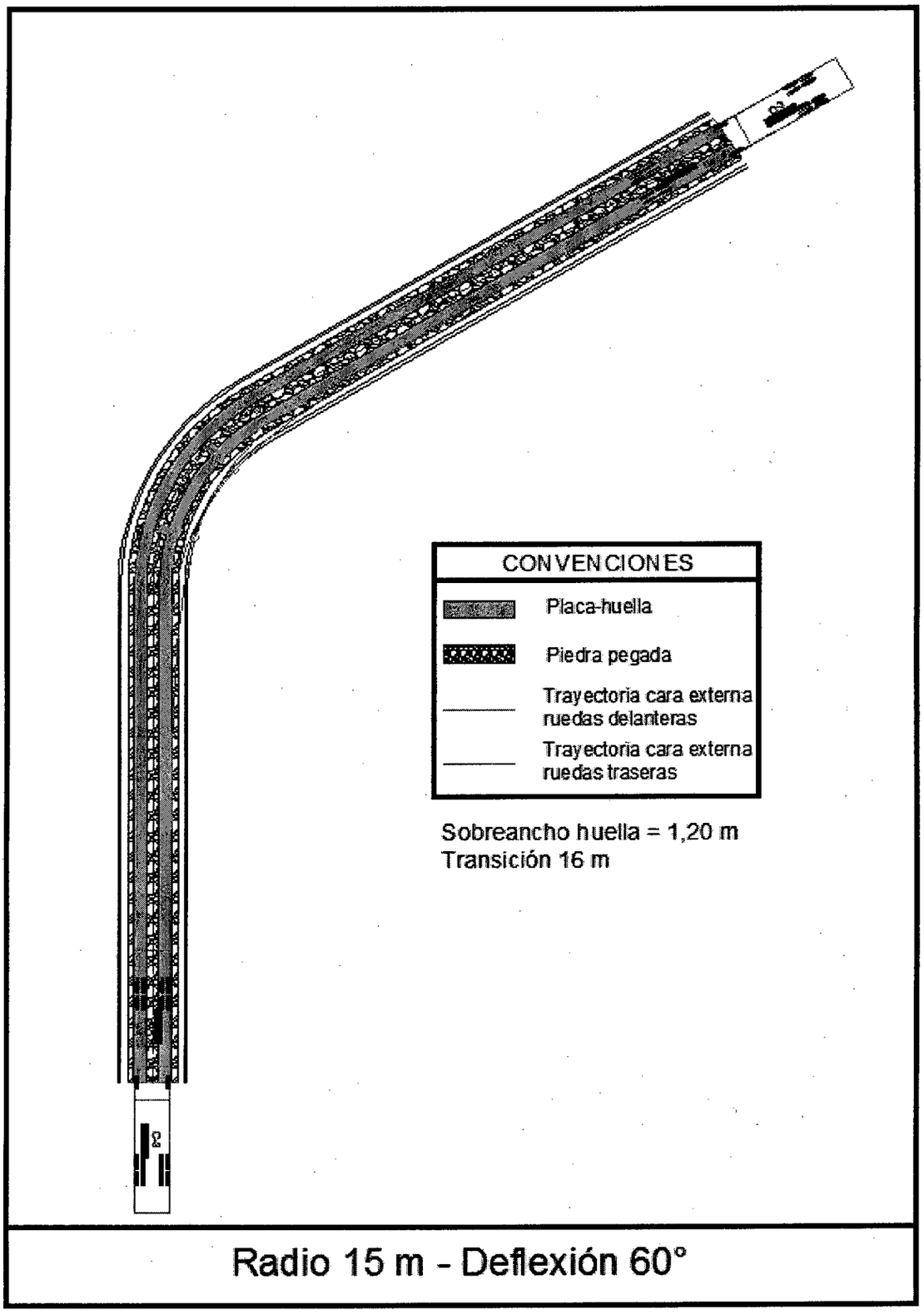
Radio 15 m - Deflexión 30°

0004401 17 OCT 2017



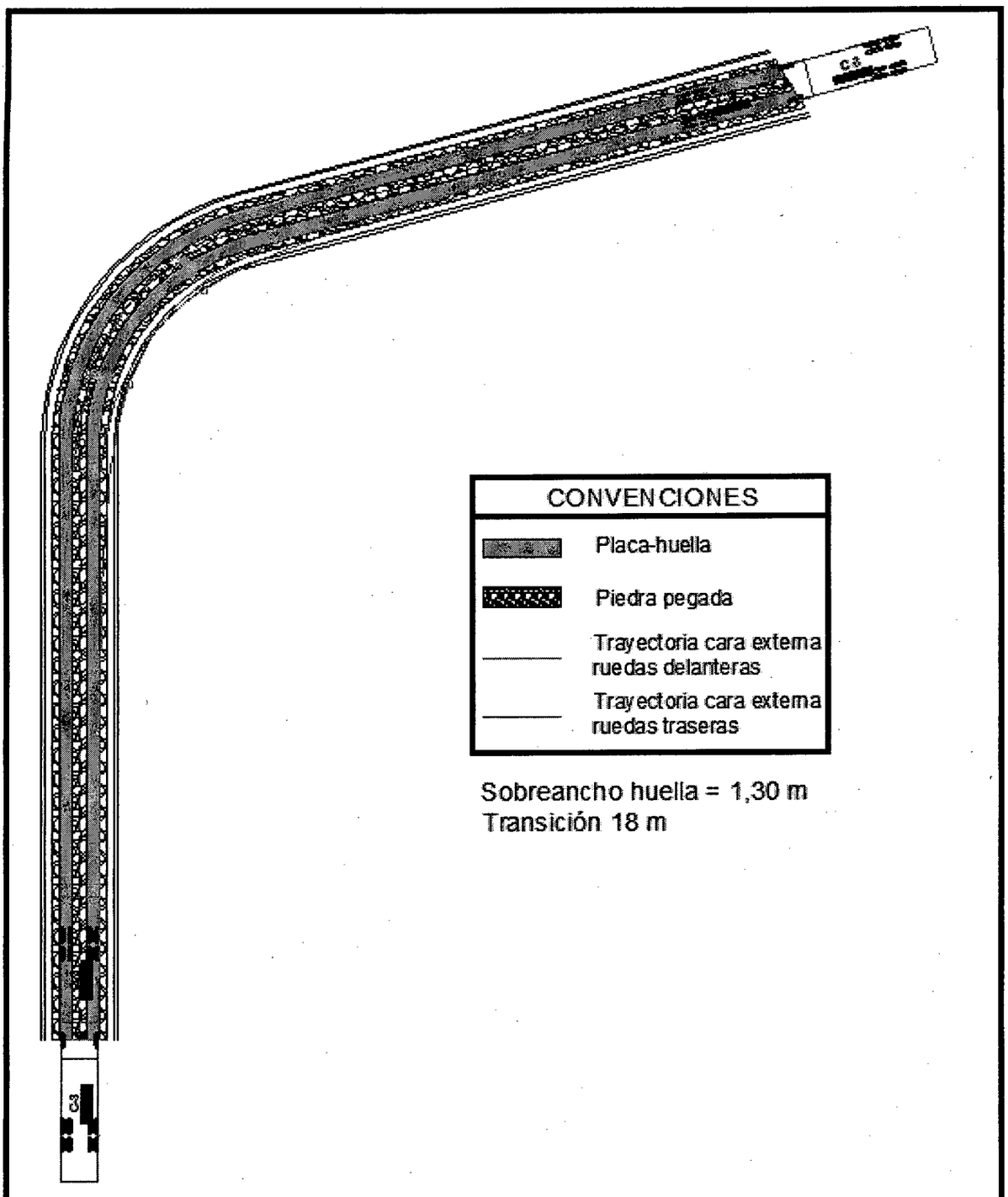
Radio 15 m - Deflexión 45°

0004401 17 OCT 2017



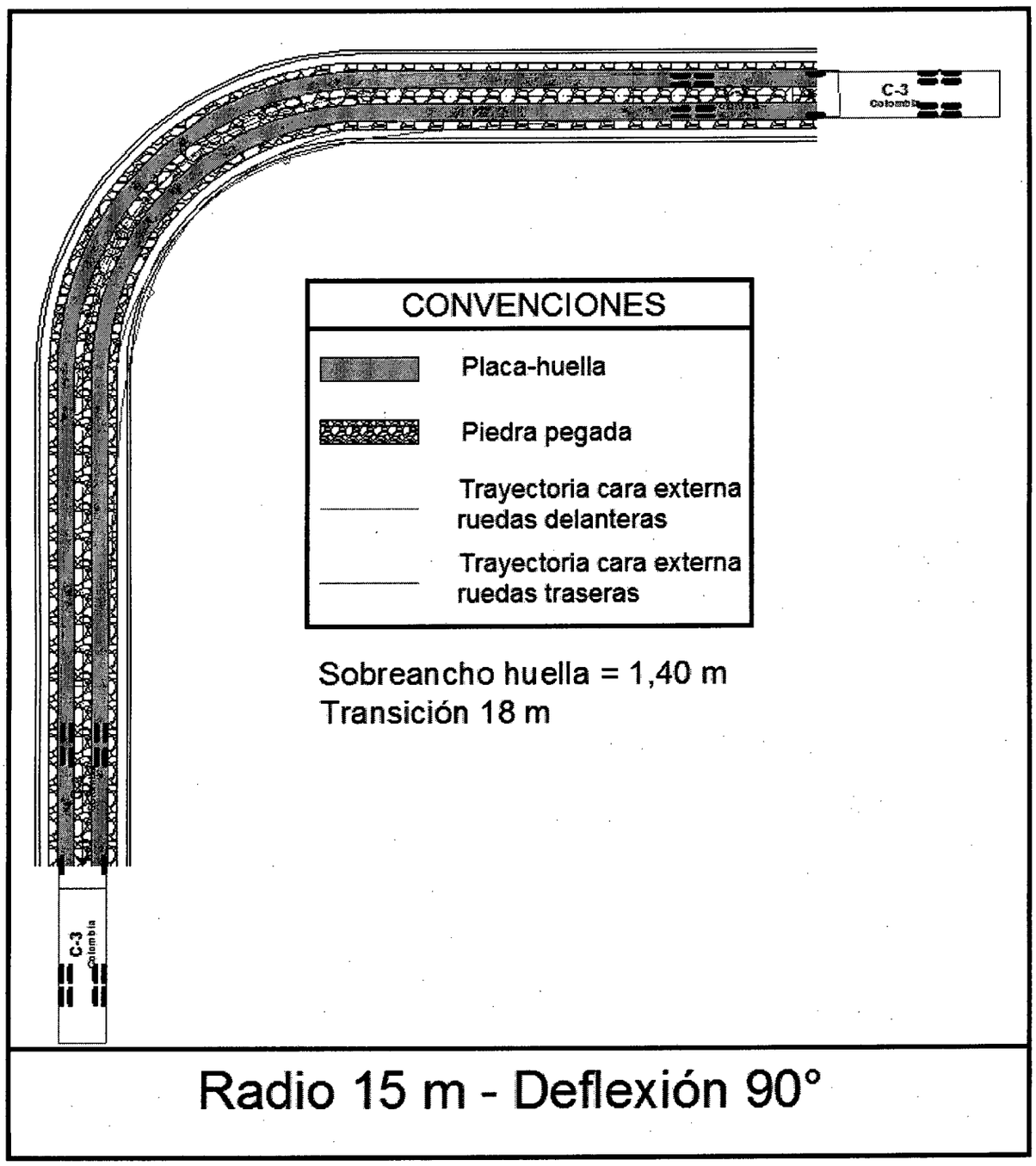
Radio 15 m - Deflexión 60°

0004401 17OCT2017



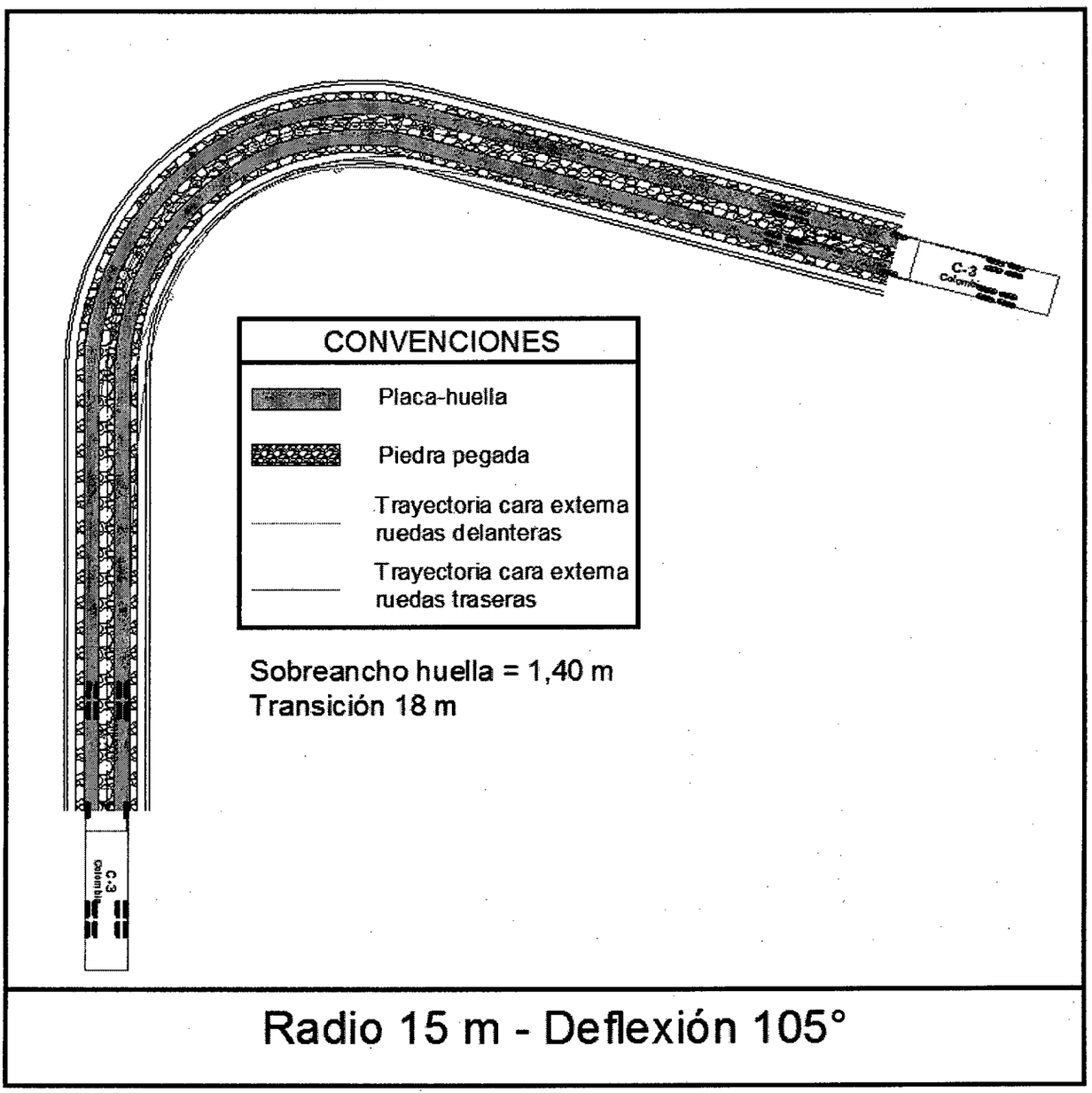
Radio 15 m - Deflexión 75°

0004401 17 OCT 2017



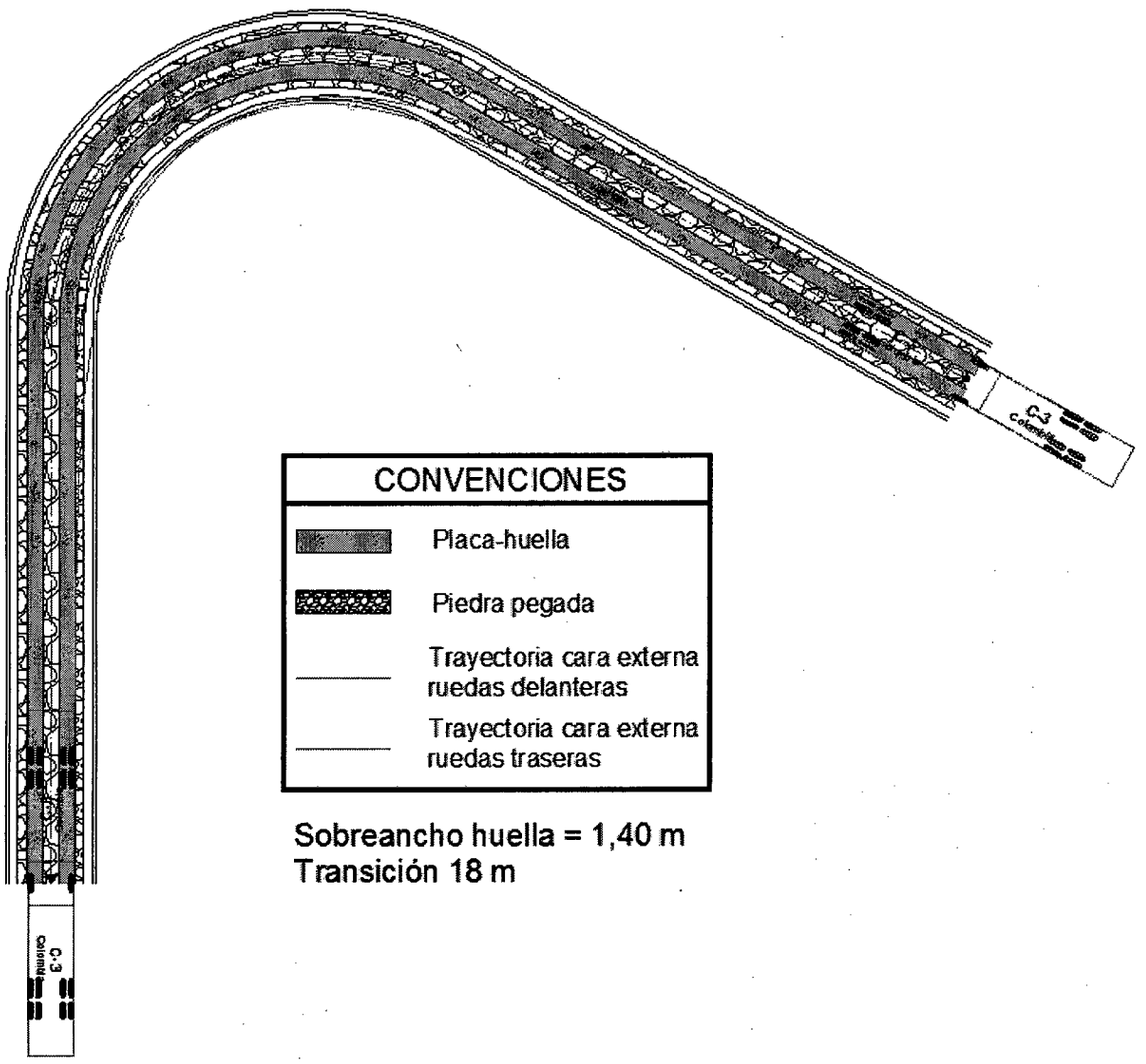
Radio 15 m - Deflexión 90°

0004401 17OCT2017



Radio 15 m - Deflexión 105°

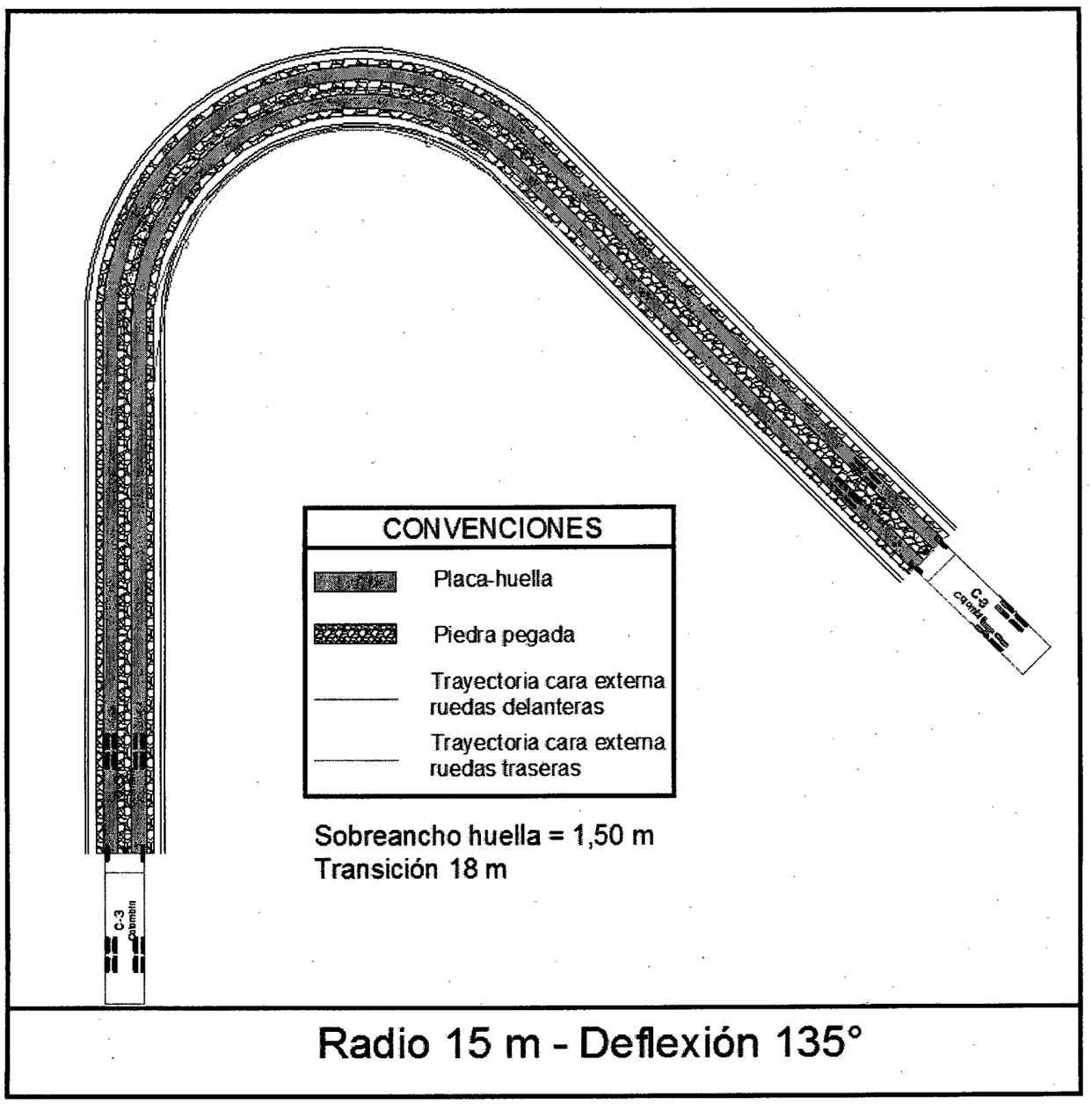
0004401 17OCT2017



Radio 15 m - Deflexión 120°

121

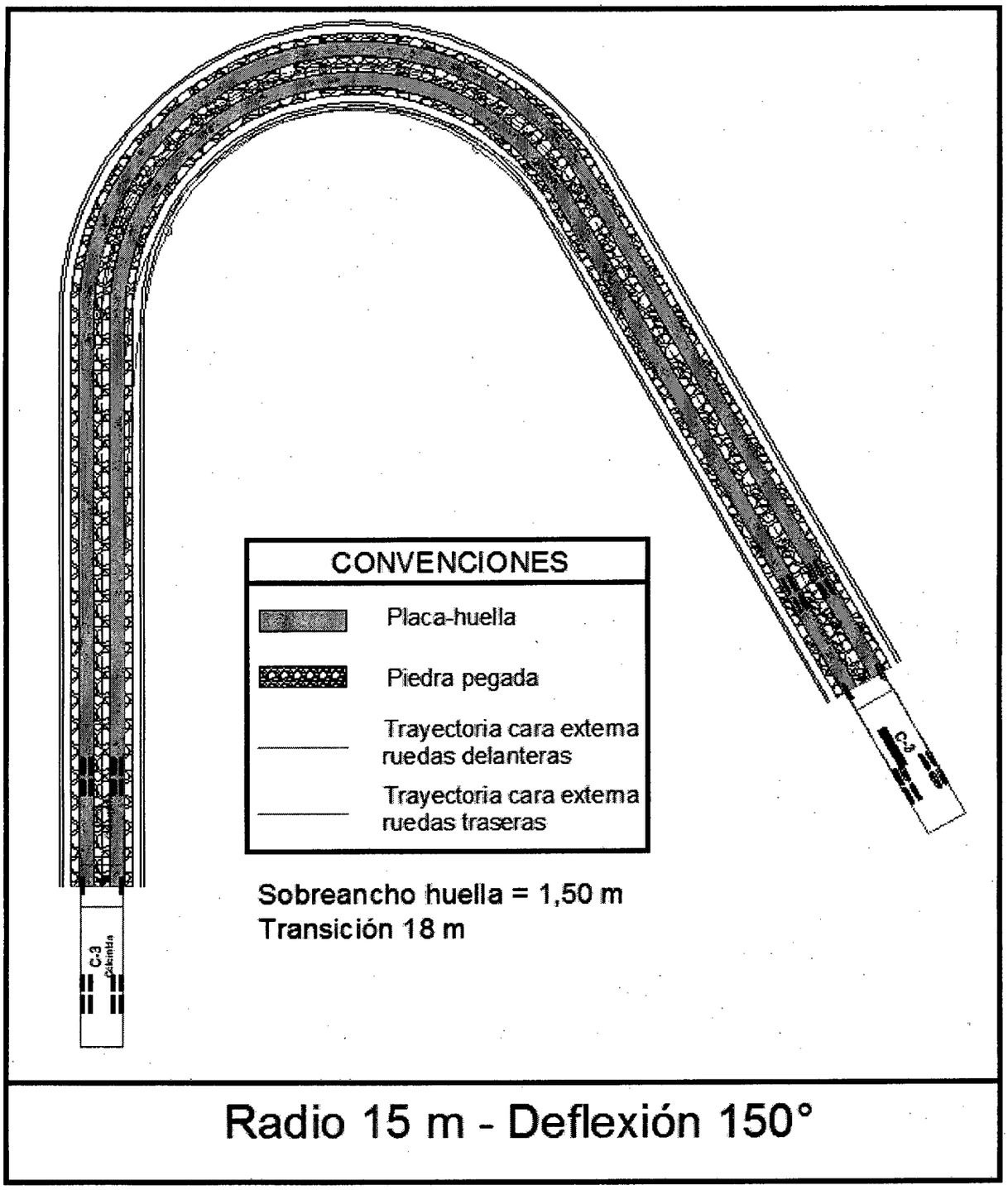
0004401 17OCT2017



Radio 15 m - Deflexión 135°

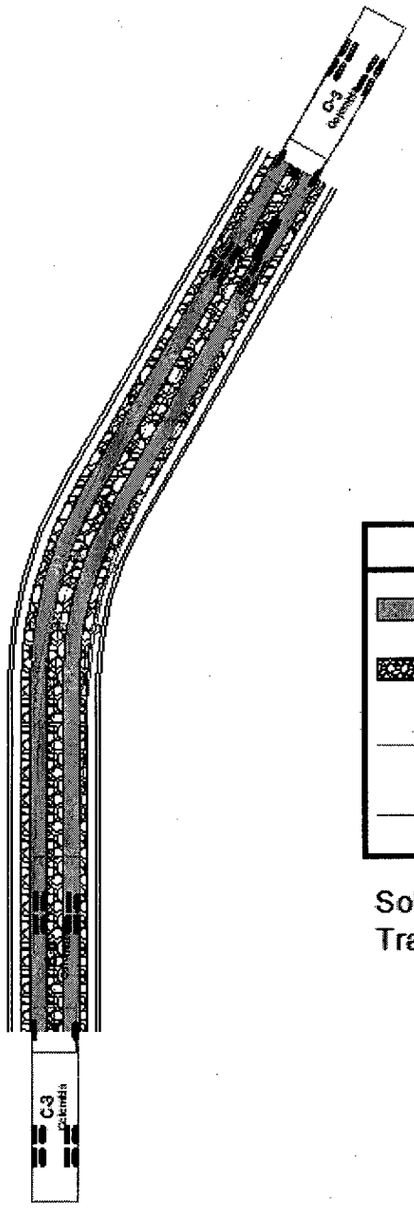
122

0004401 17OCT2017



Radio 15 m - Deflexión 150°

0004401 17OCT2017



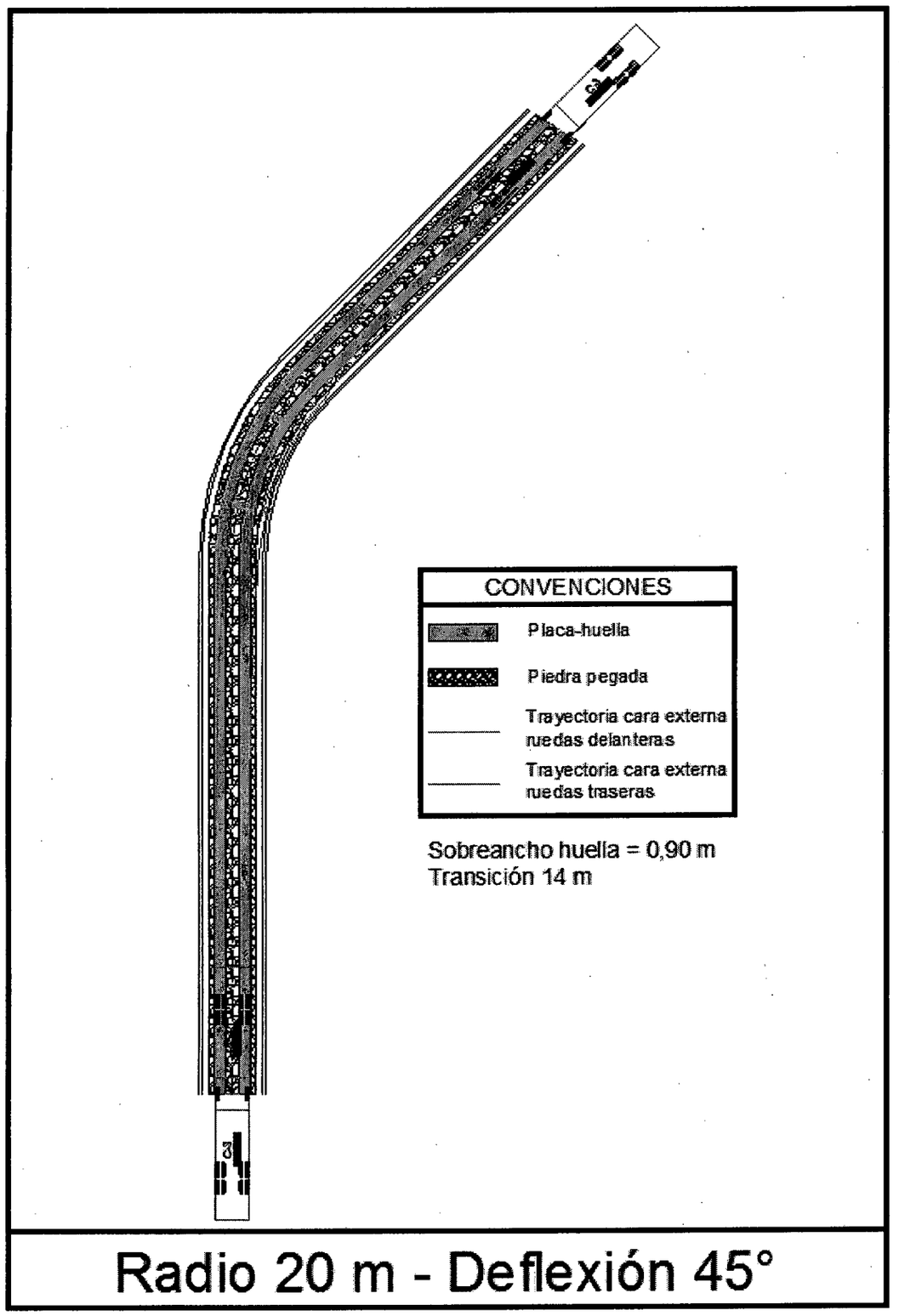
CONVENCIONES

- Placa-huella
- Piedra pegada
- Trayectoria cara externa ruedas delanteras
- Trayectoria cara externa ruedas traseras

Sobreancho huella = 0,70 m
Transición 13 m

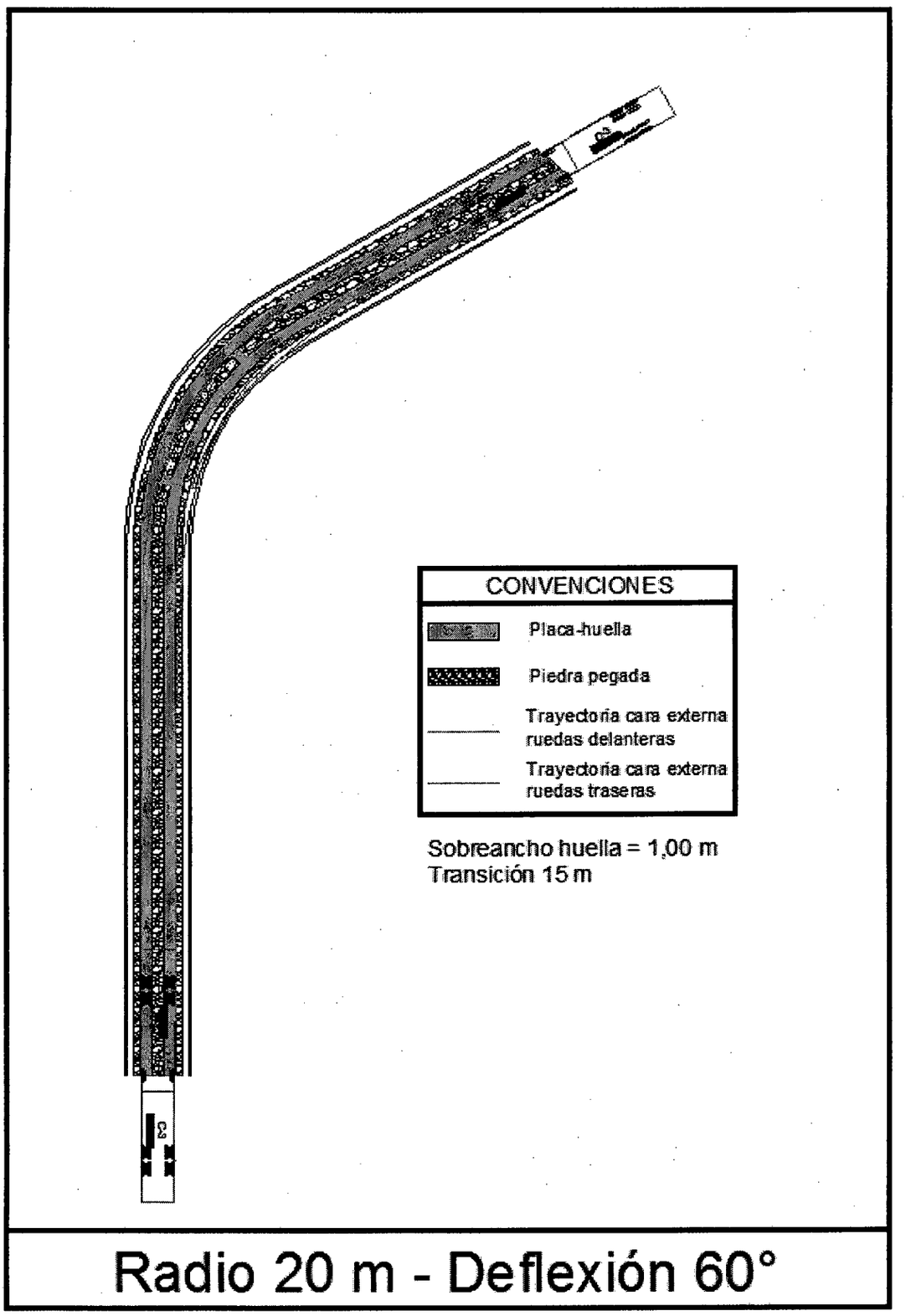
Radio 20 m - Deflexión 30°

0004401 17 OCT 2017



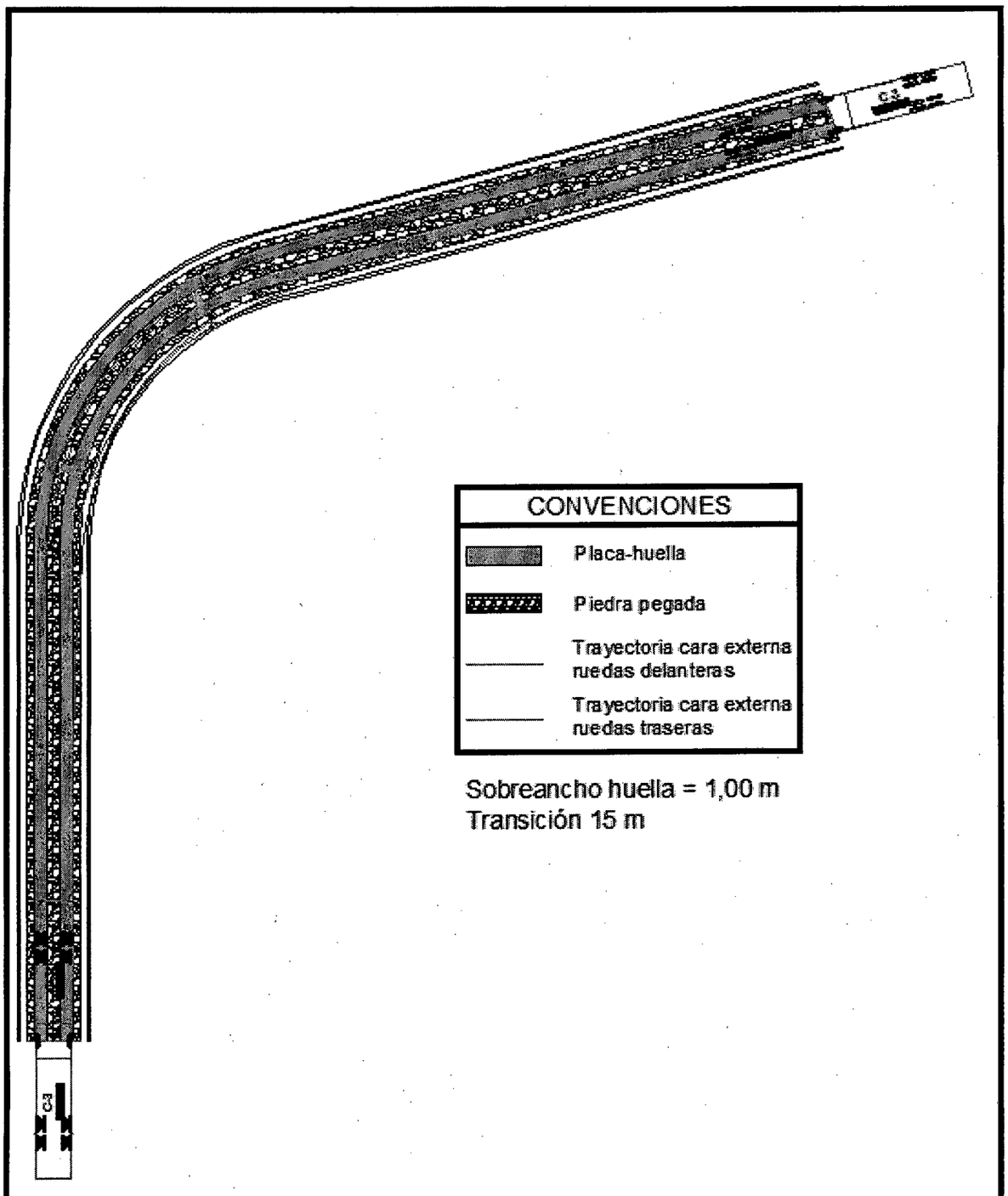
Radio 20 m - Deflexión 45°

0004401 17OCT2017



Radio 20 m - Deflexión 60°

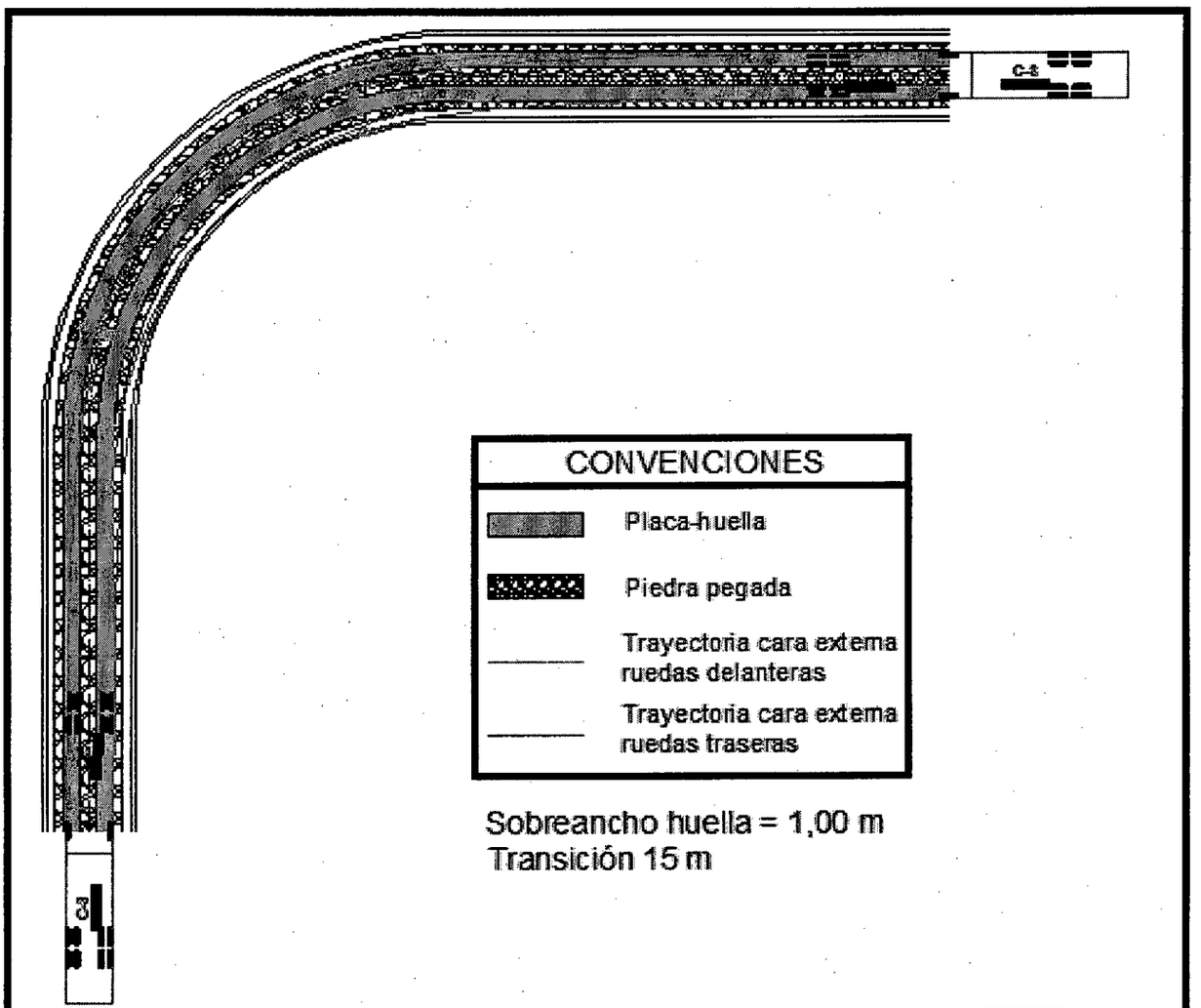
0004401 17OCT2017



Radio 20 m - Deflexión 75°

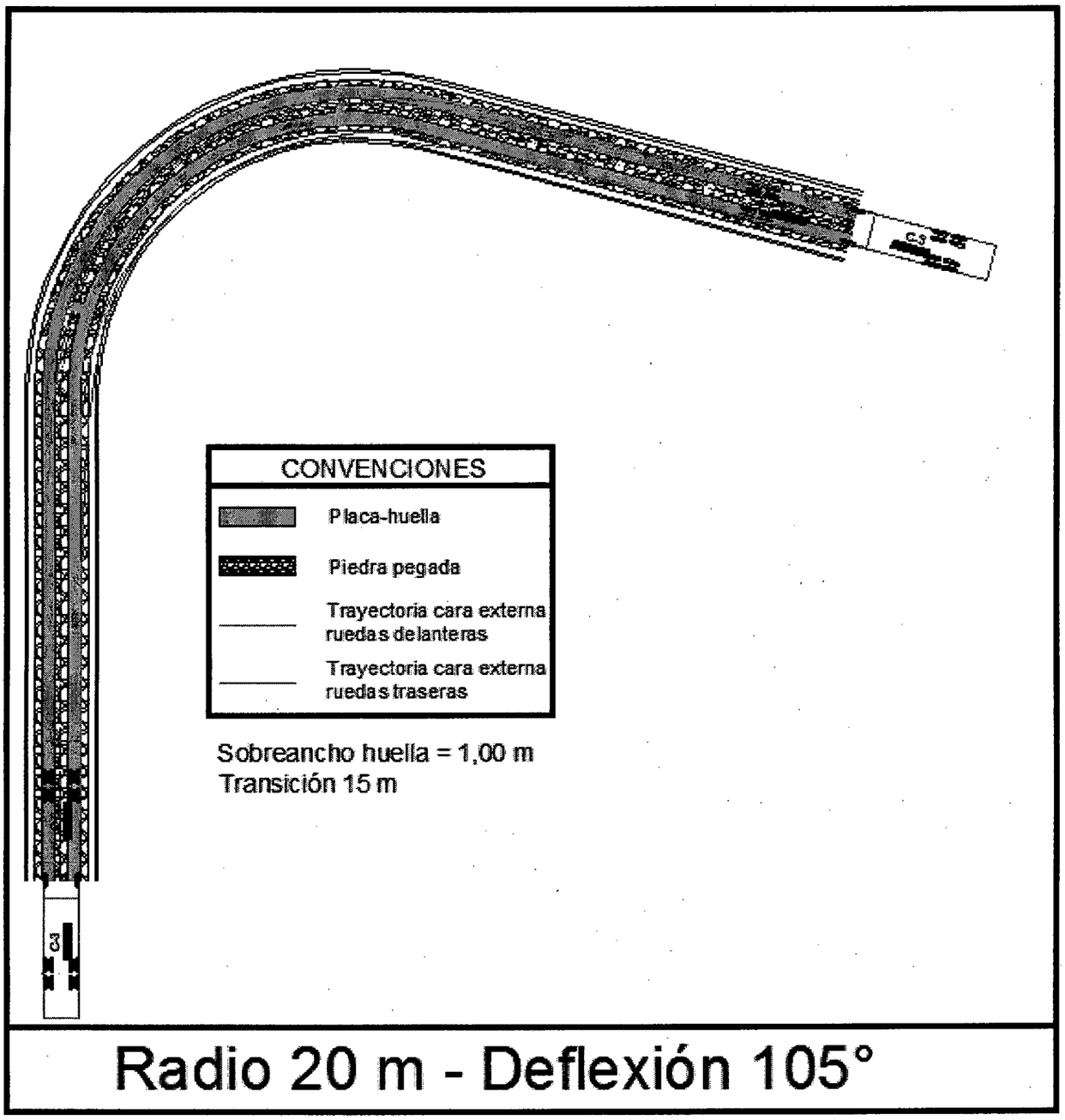
127

0004401 17OCT2017



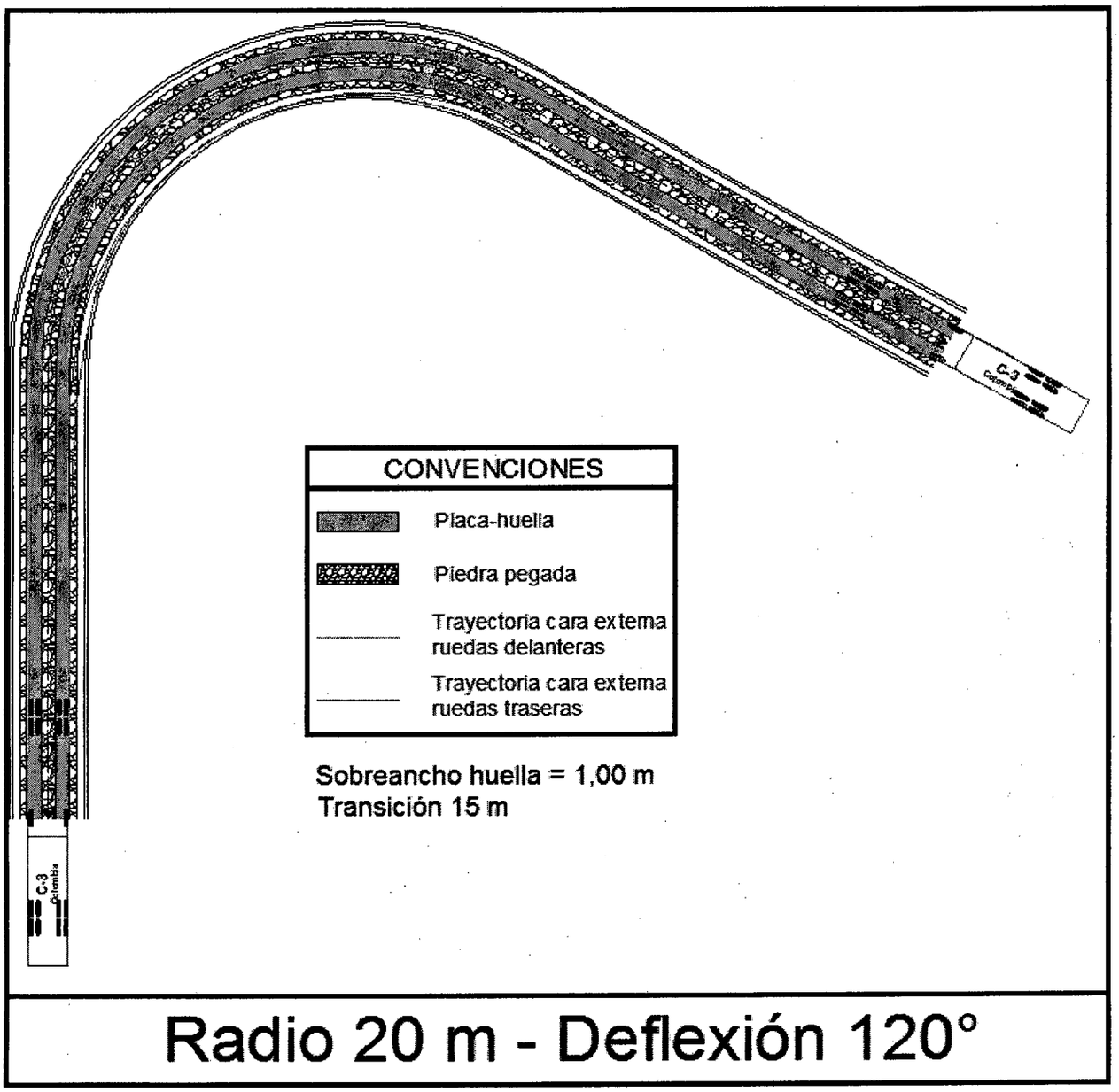
Radio 20 m - Deflexión 90°

0004401 17OCT2017



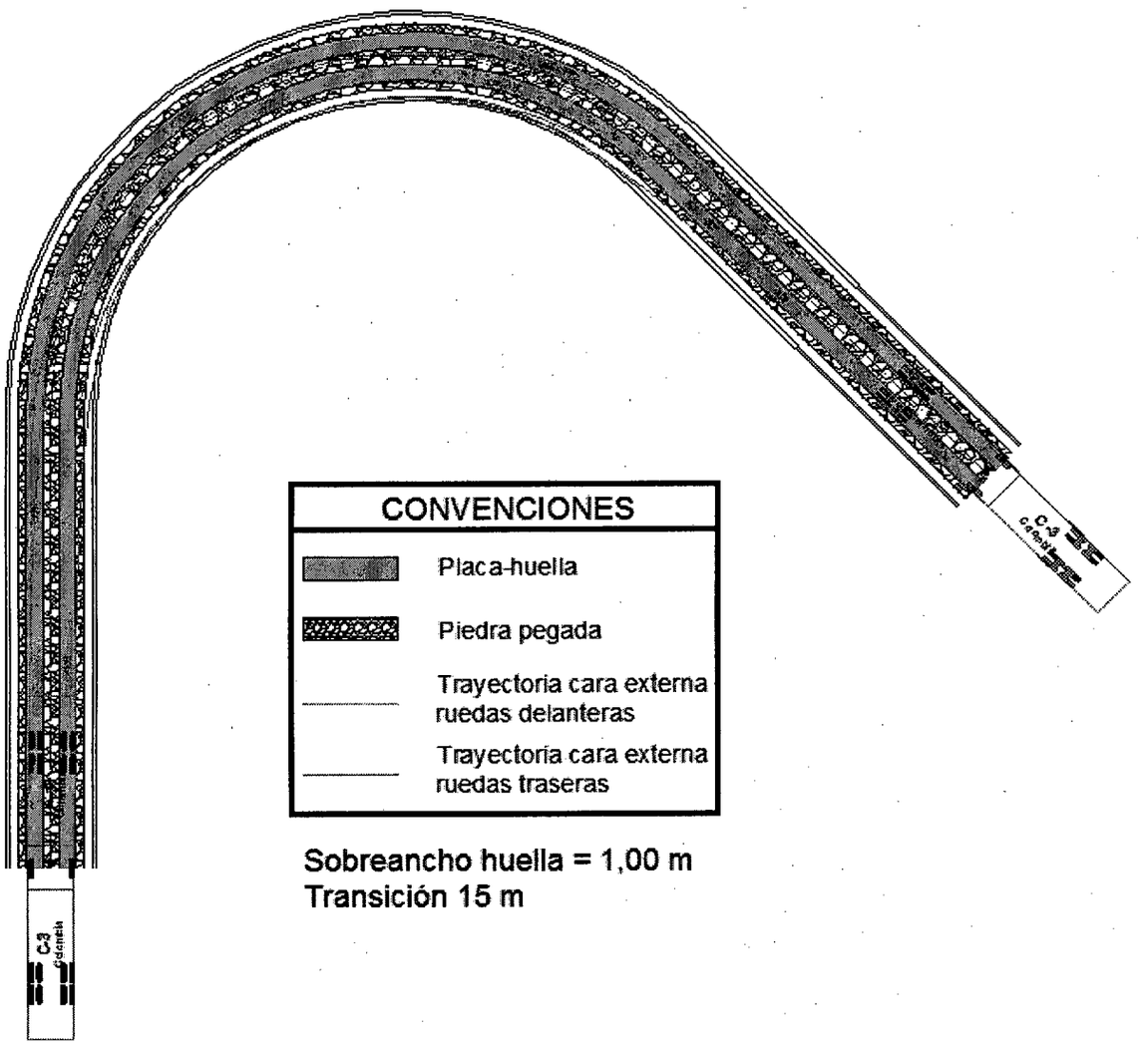
Radio 20 m - Deflexión 105°

0004401 17OCT2017



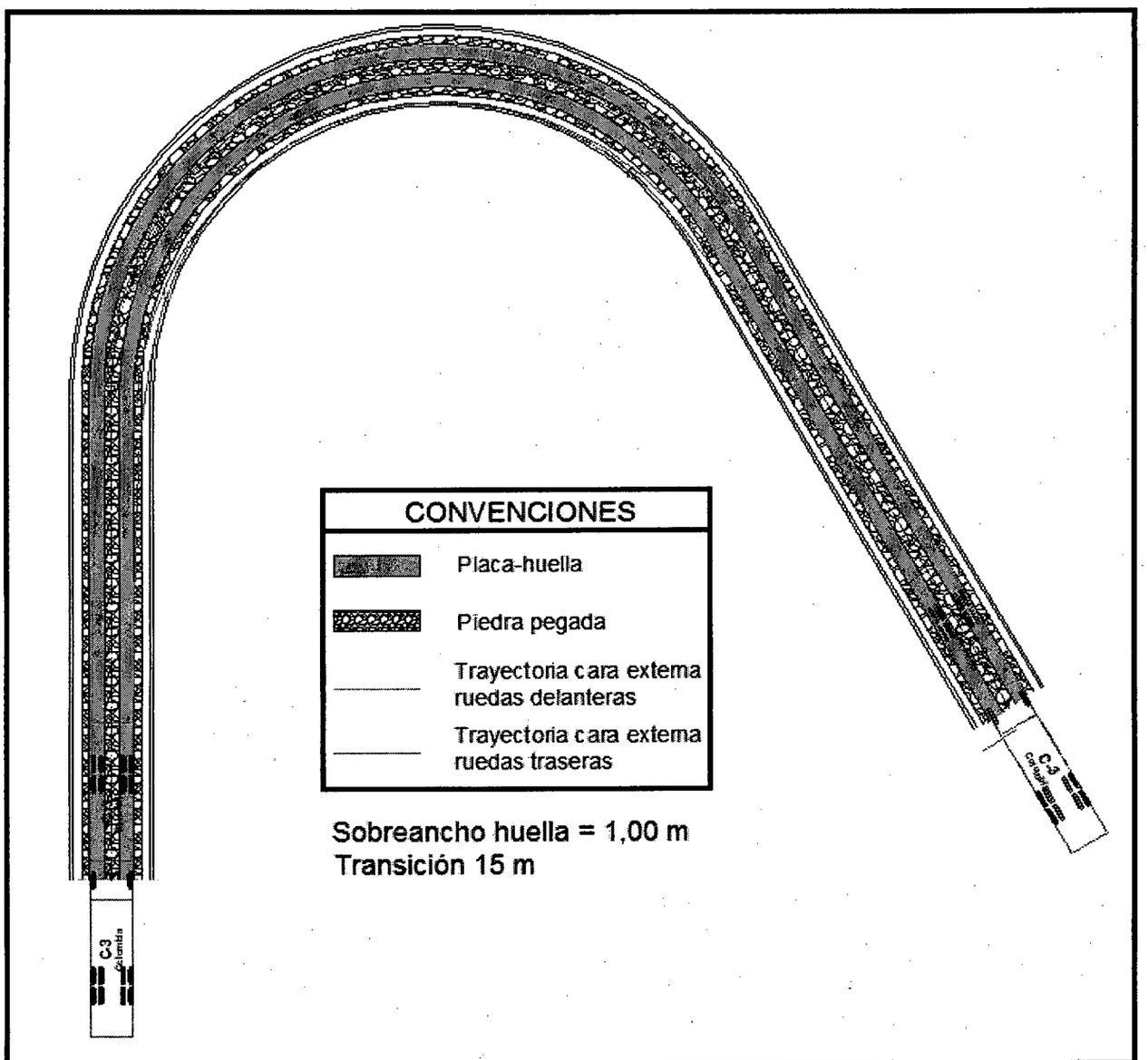
Radio 20 m - Deflexión 120°

0004401 17OCT2017



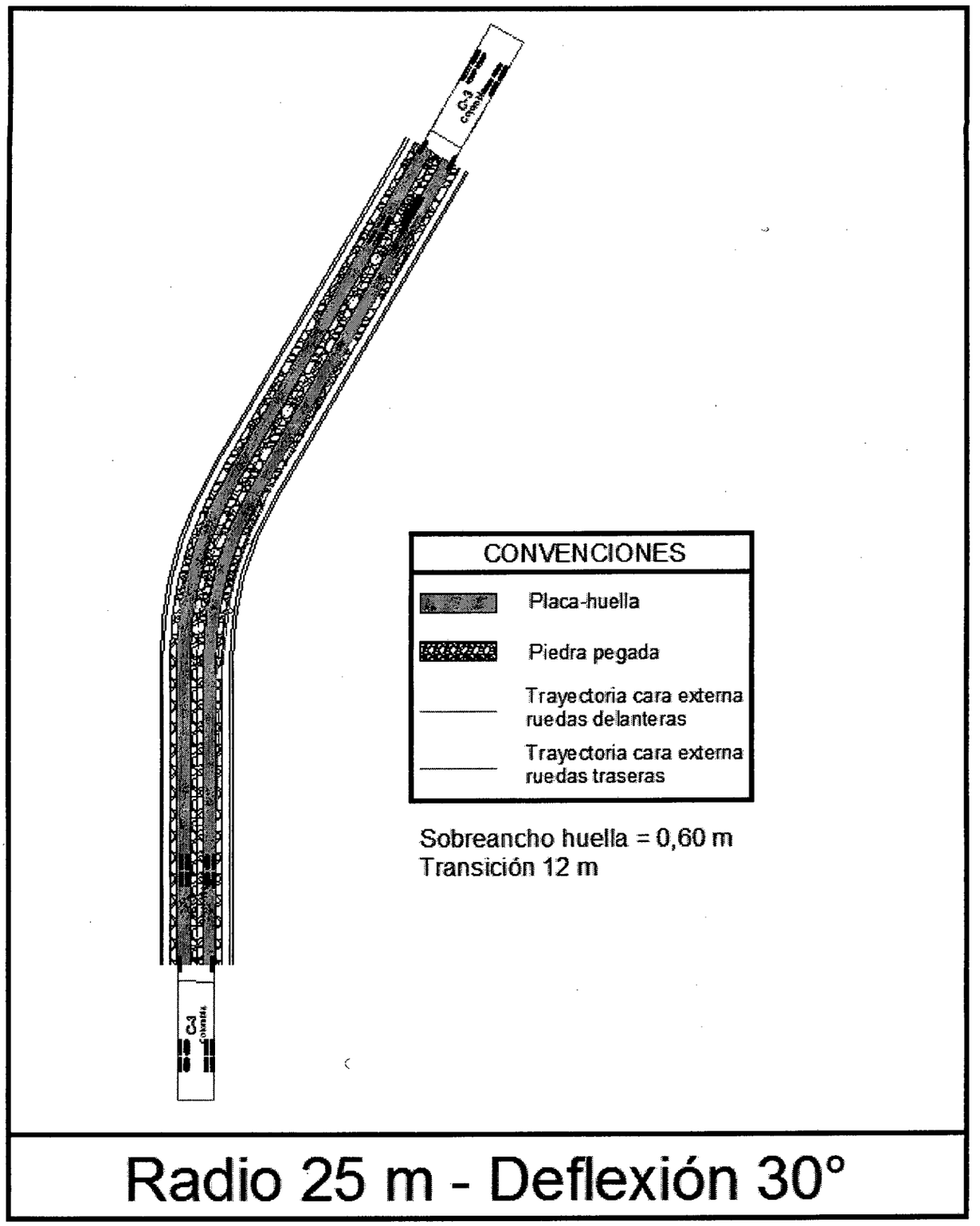
Radio 20 m - Deflexión 135°

0004401 17 OCT 2017



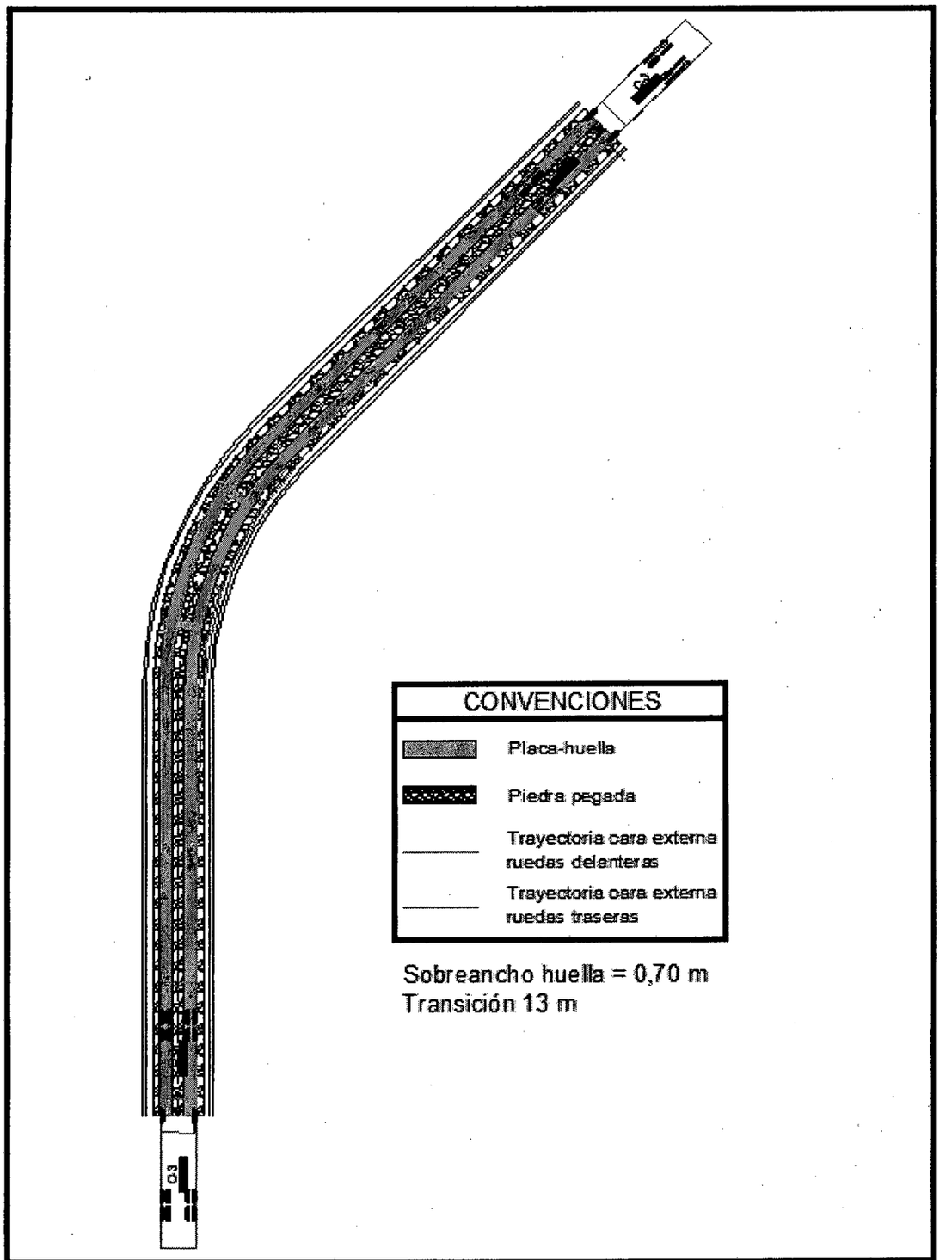
Radio 20 m - Deflexión 150°

0004401 17OCT2017



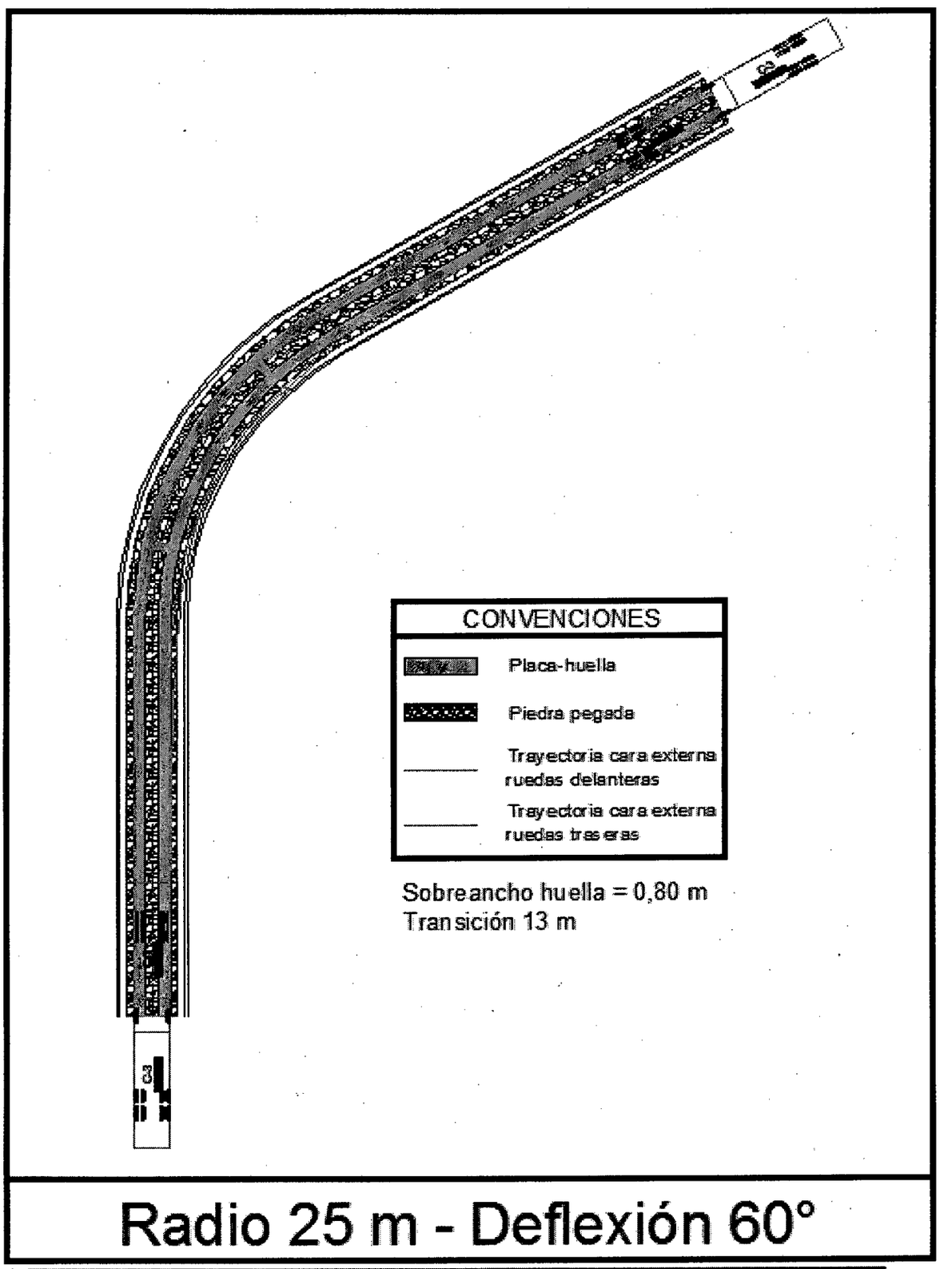
Radio 25 m - Deflexión 30°

0004401 17OCT2017



Radio 25 m - Deflexión 45°

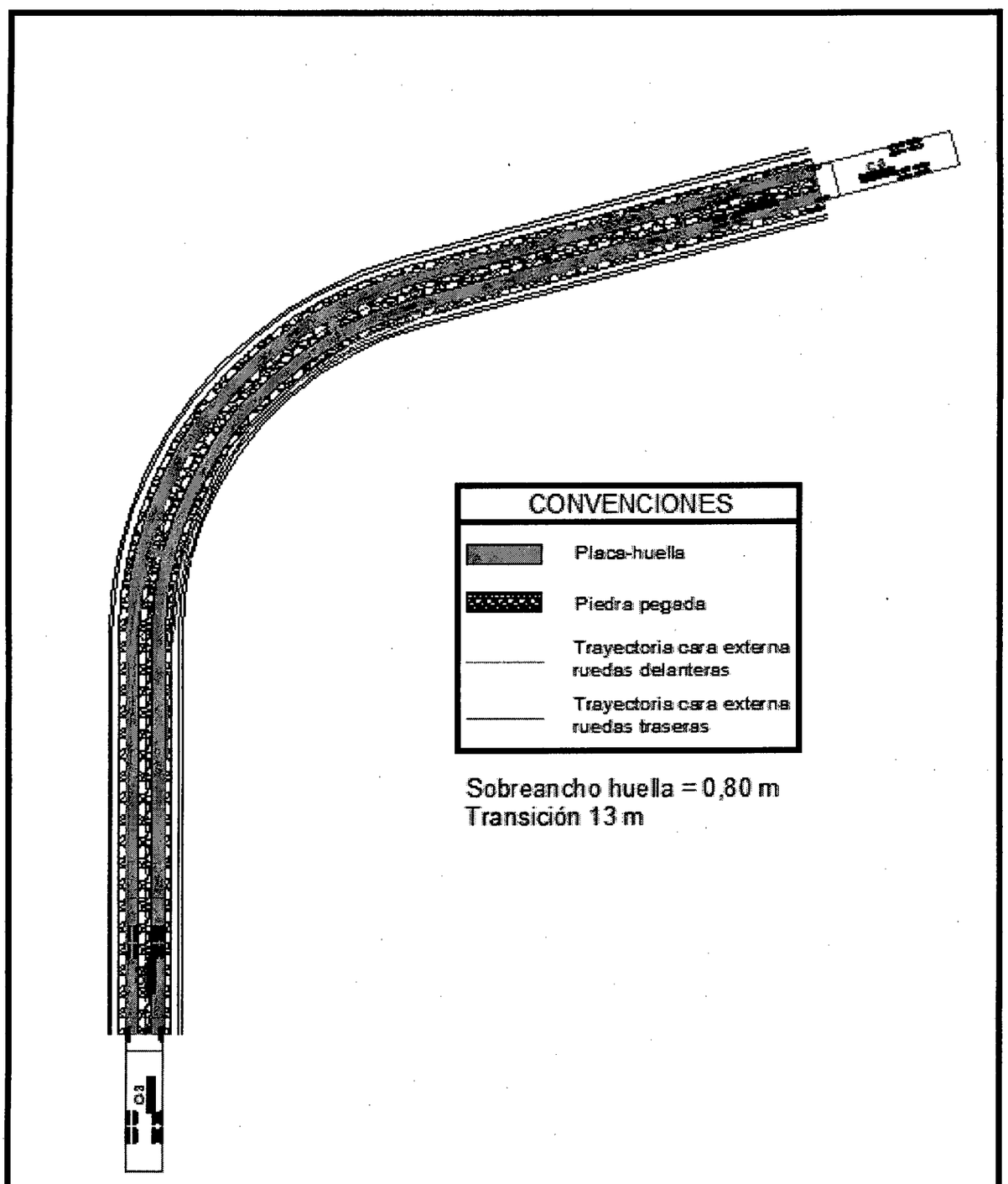
0004401 17OCT2017



Radio 25 m - Deflexión 60°

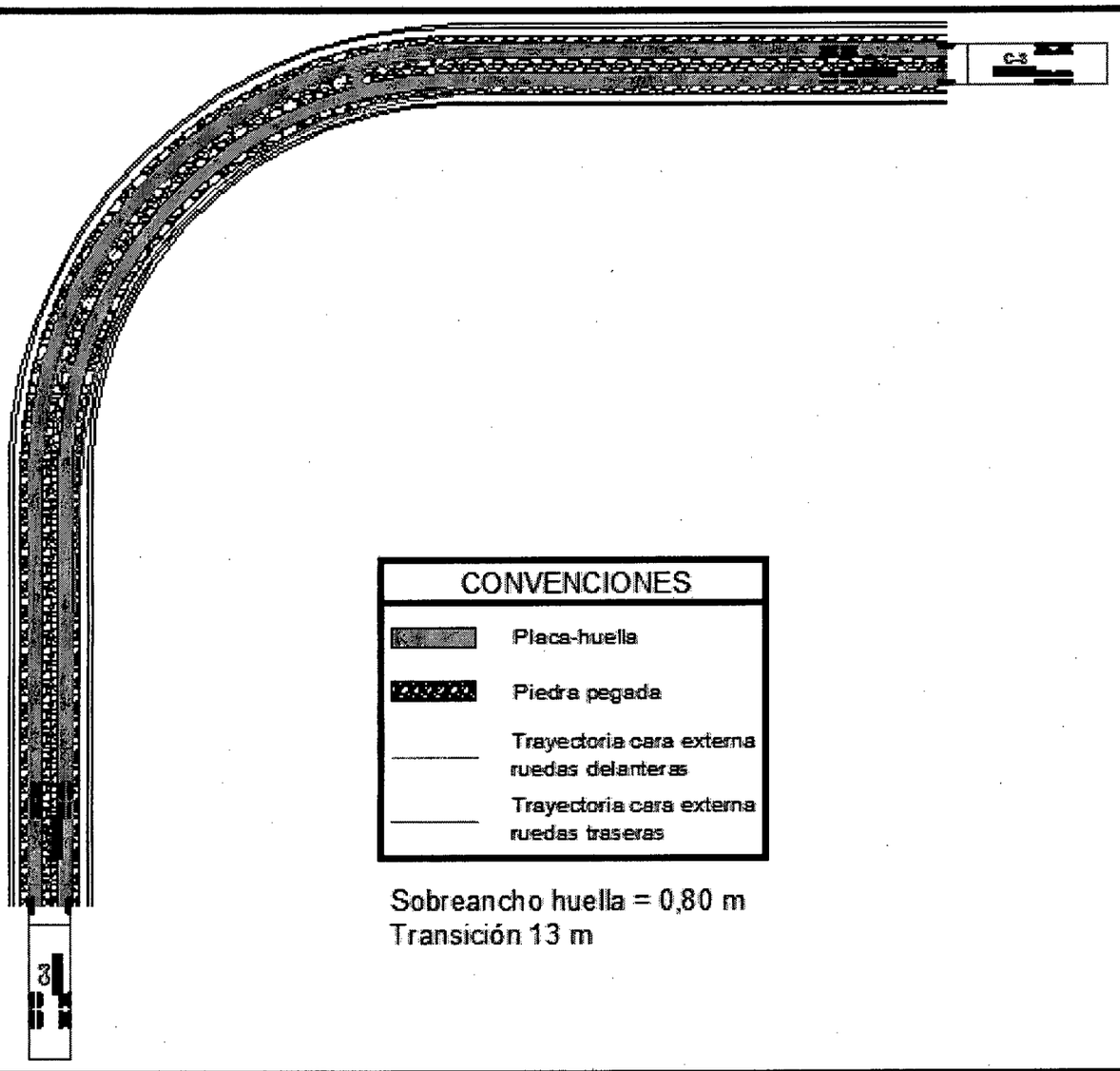
135

0004401 17OCT2017



Radio 25 m - Deflexión 75°

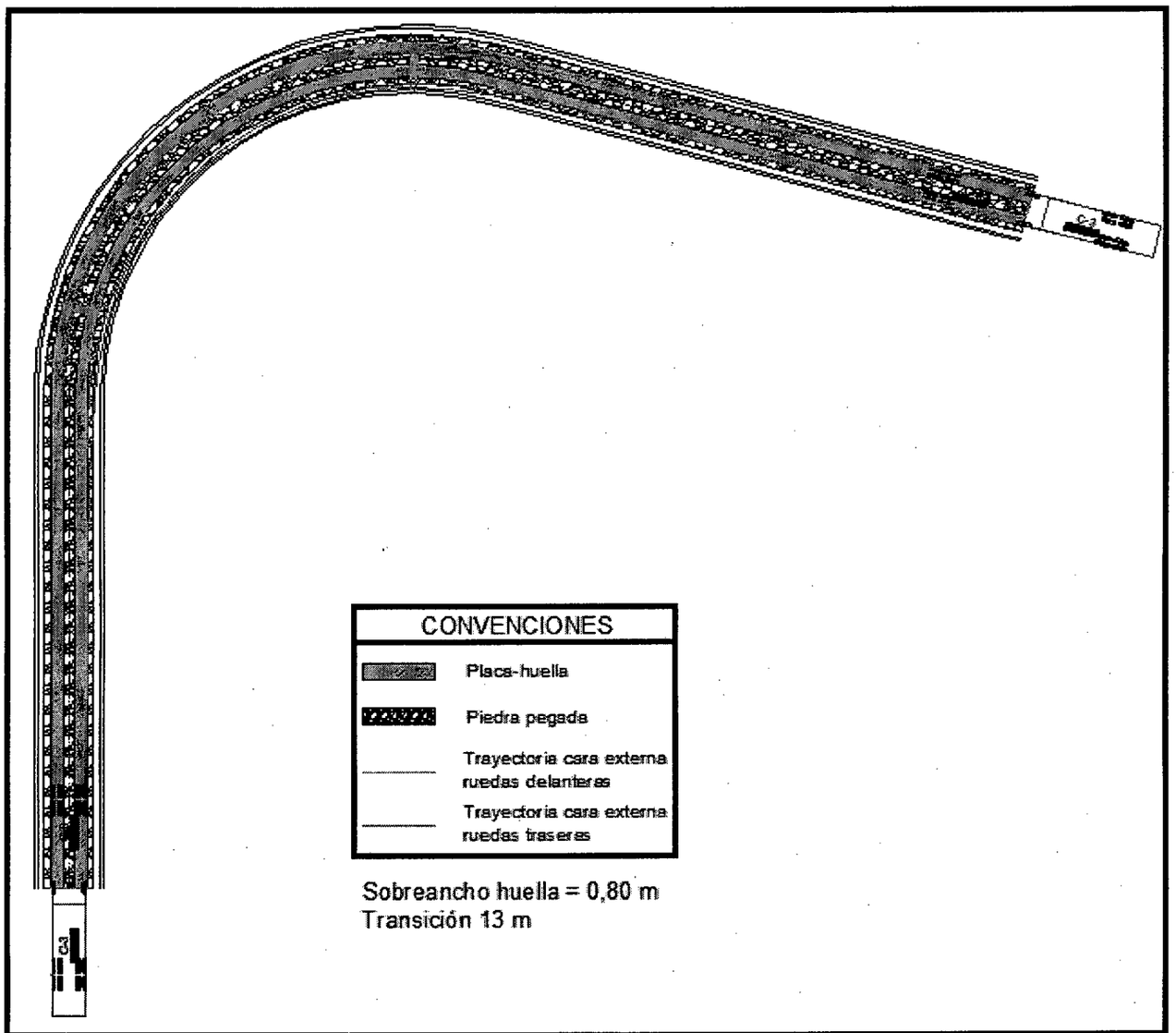
0004401 17 OCT 2017



Radio 25 m - Deflexión 90°

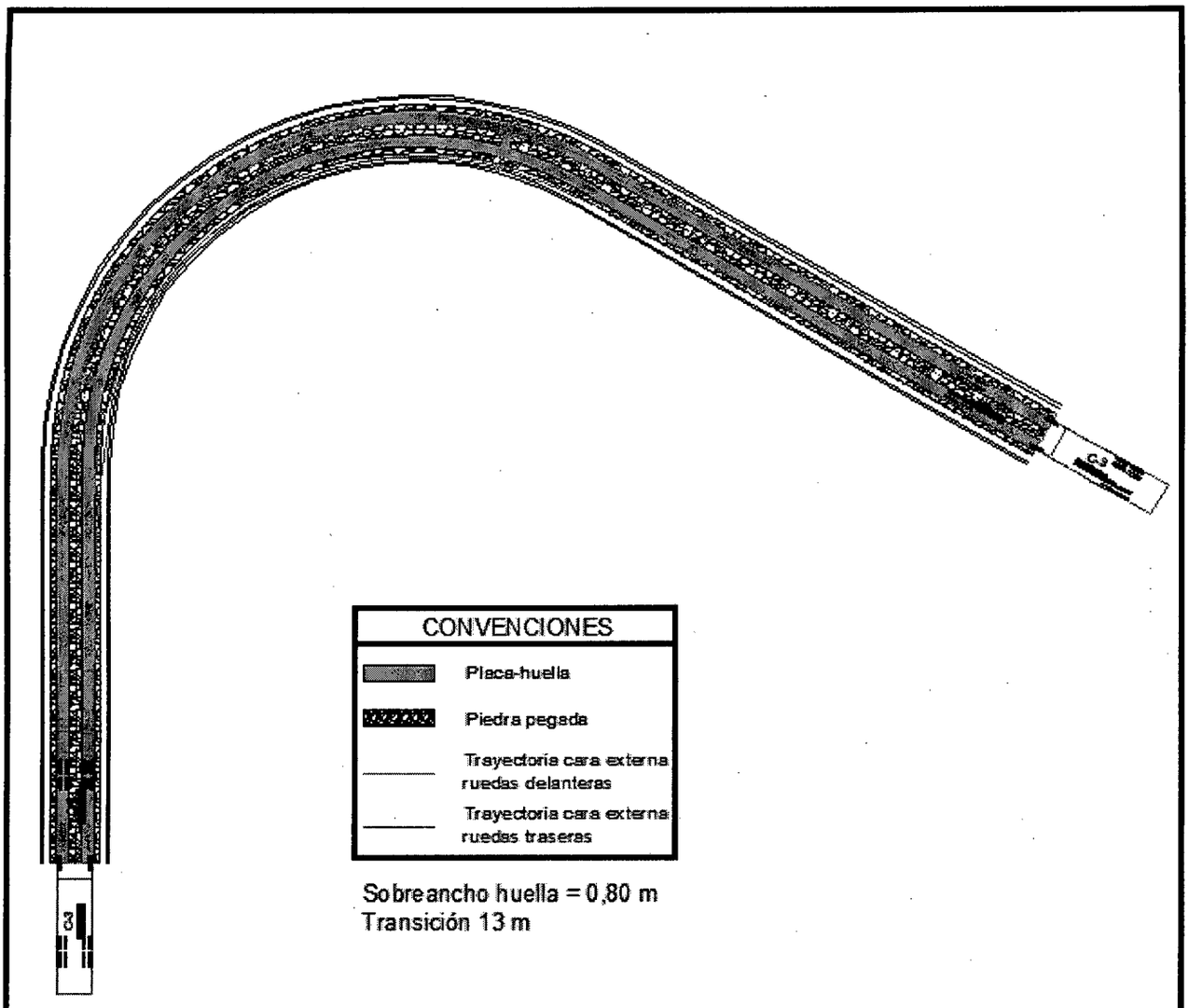
137

0004401 17OCT2017



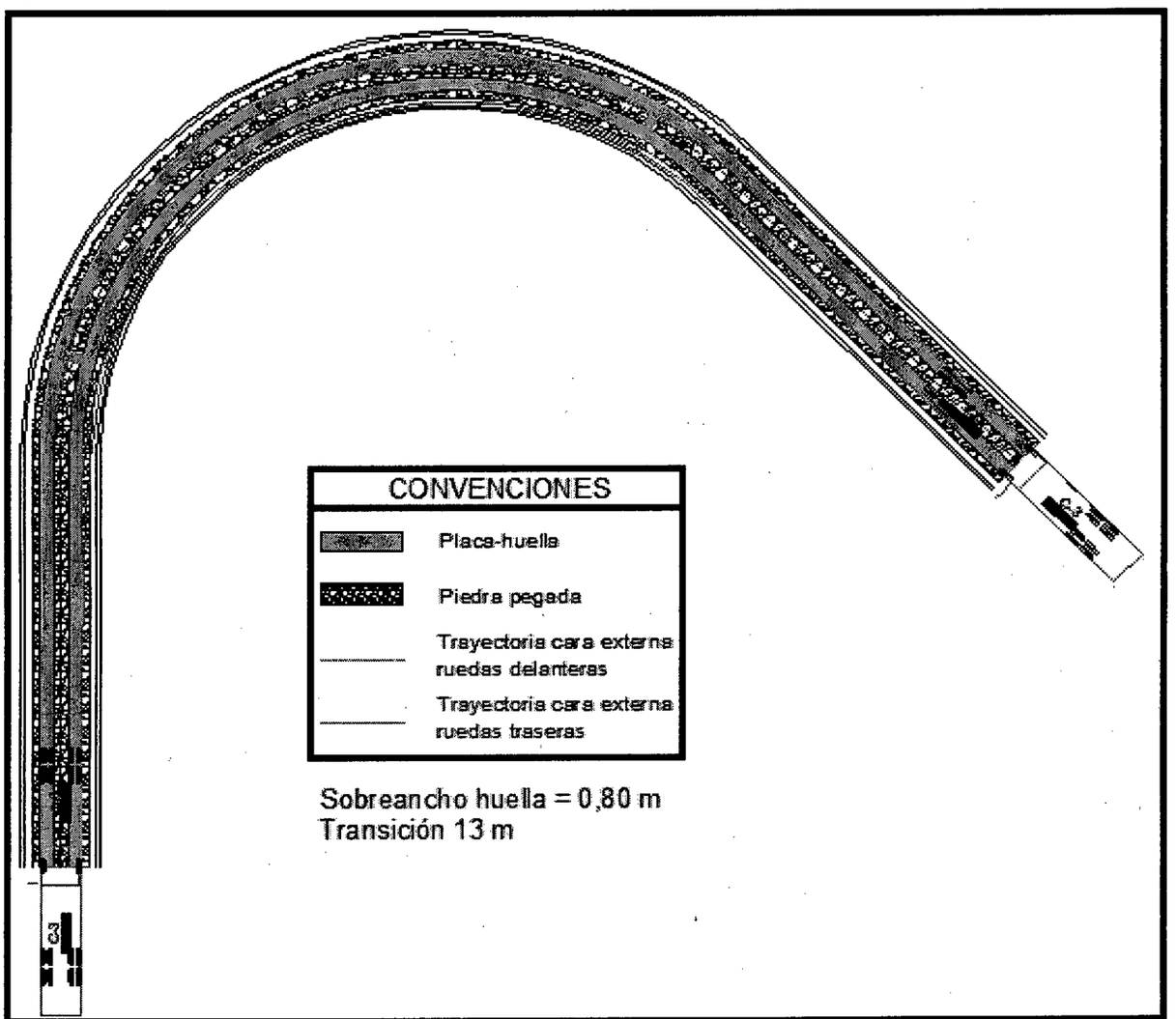
Radio 25 m - Deflexión 105°

0004401 17OCT2017



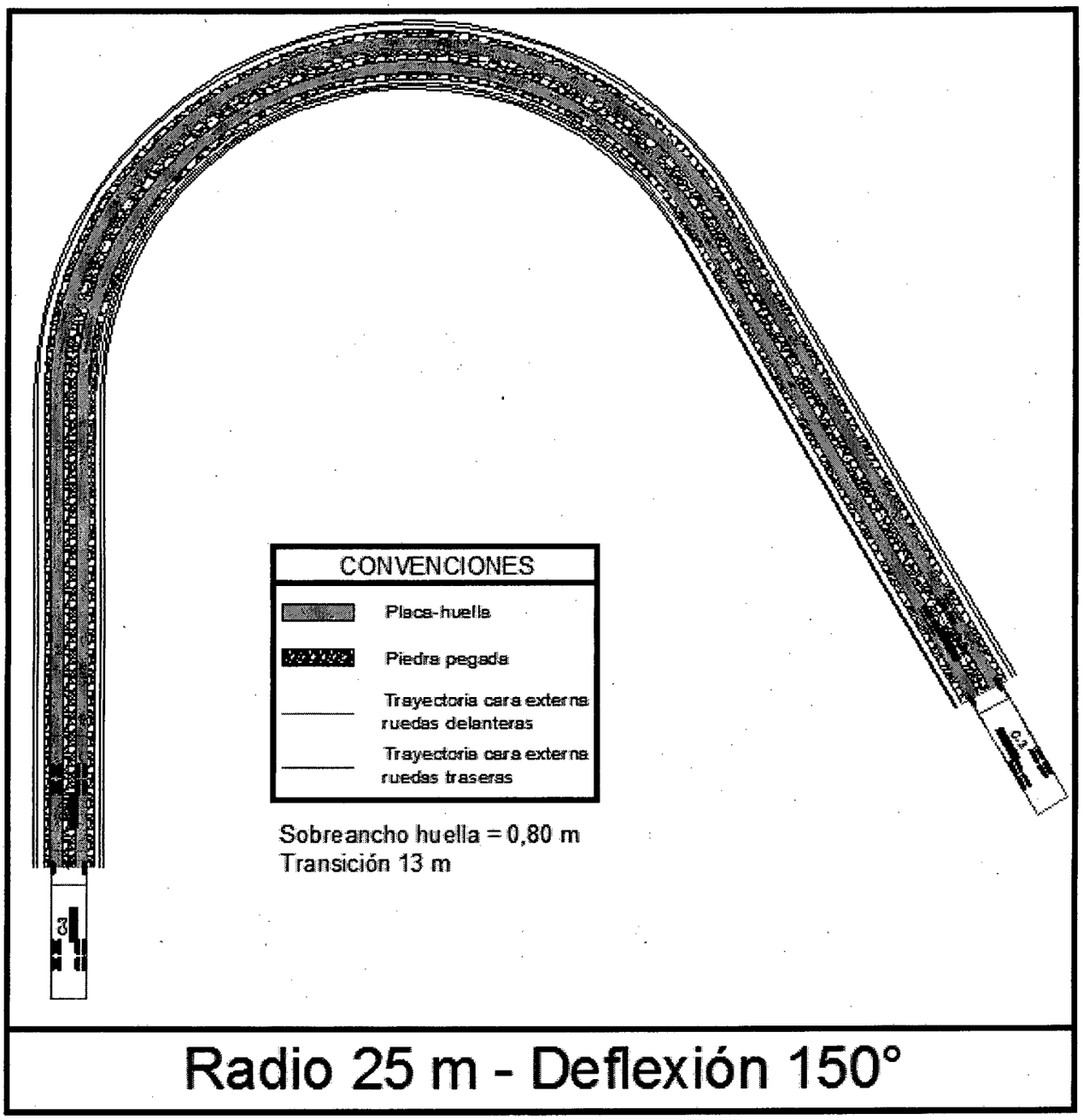
Radio 25 m - Deflexión 120°

0004401 17OCT2017



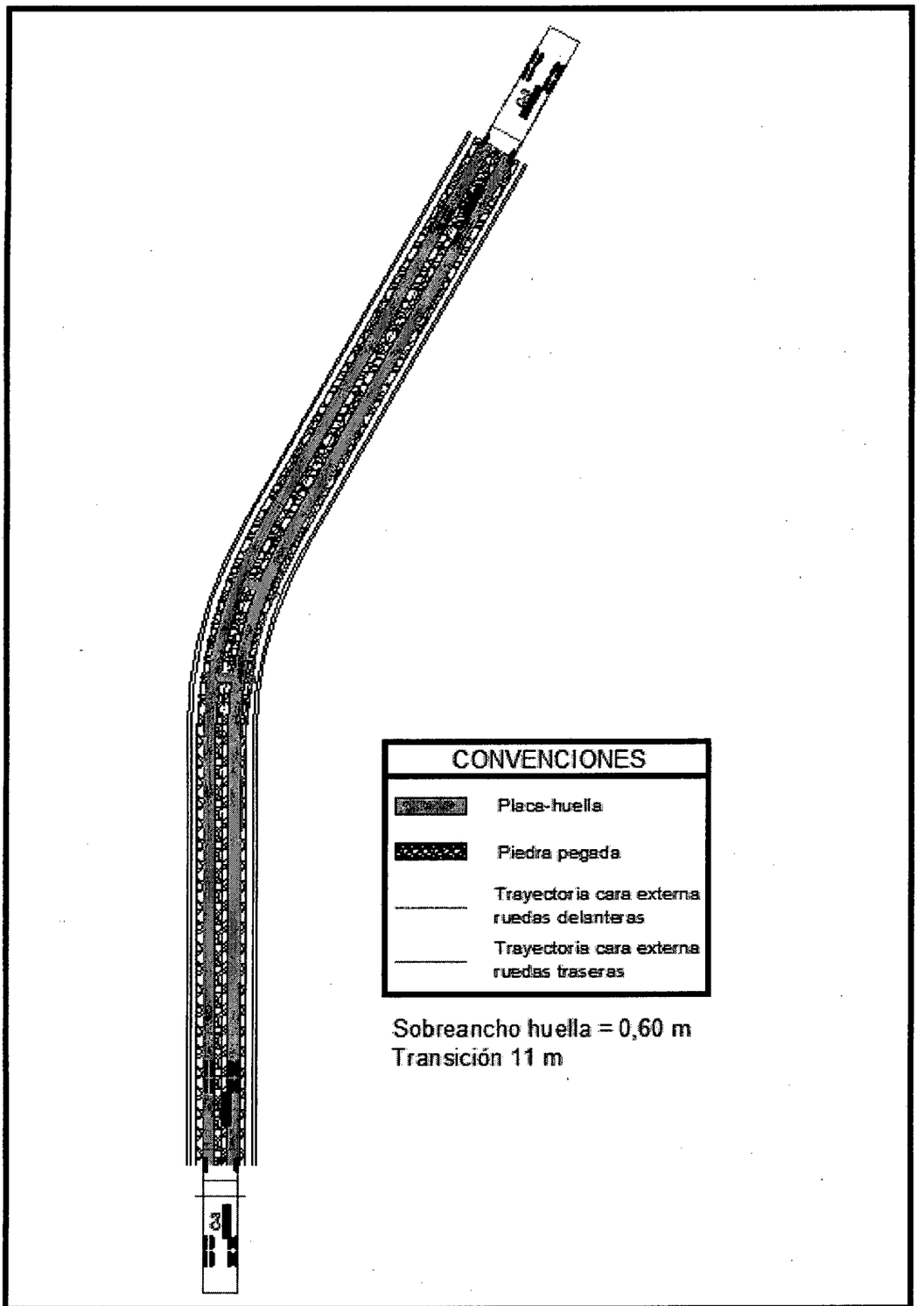
Radio 25 m - Deflexión 135°

0004401 17OCT2017



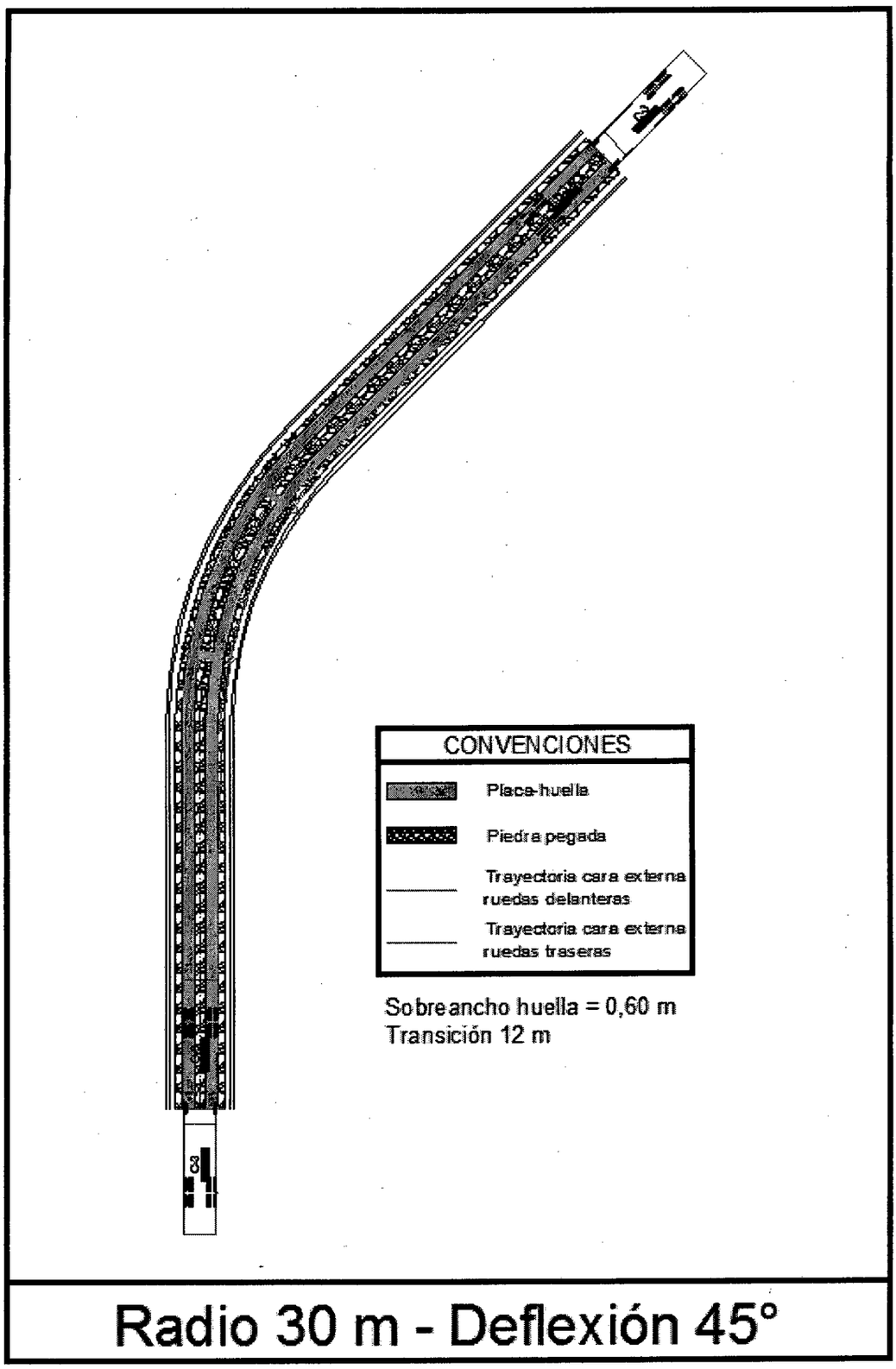
Radio 25 m - Deflexión 150°

0004401 17OCT2017



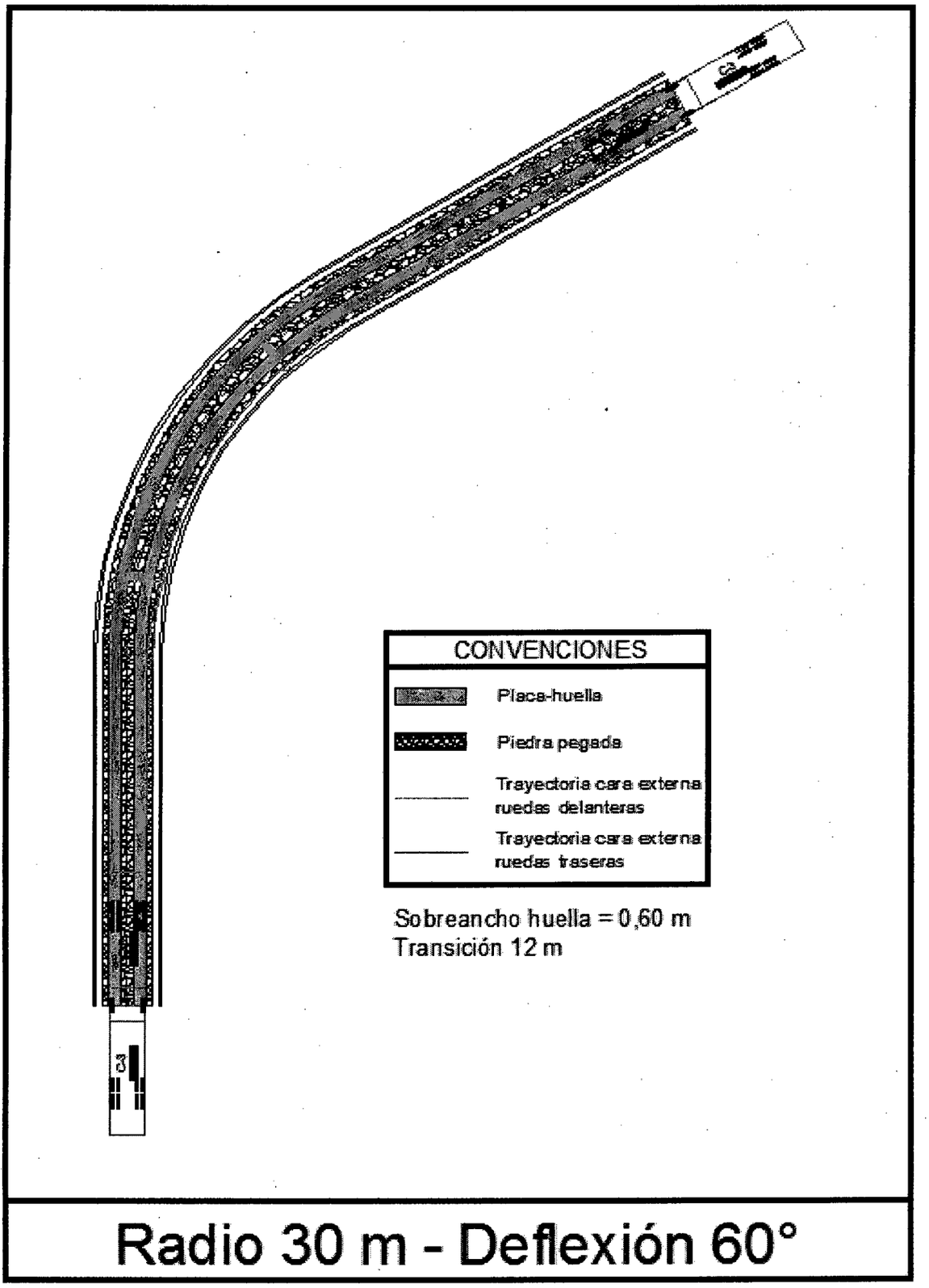
Radio 30 m - Deflexión 30°

0004401 17OCT2017



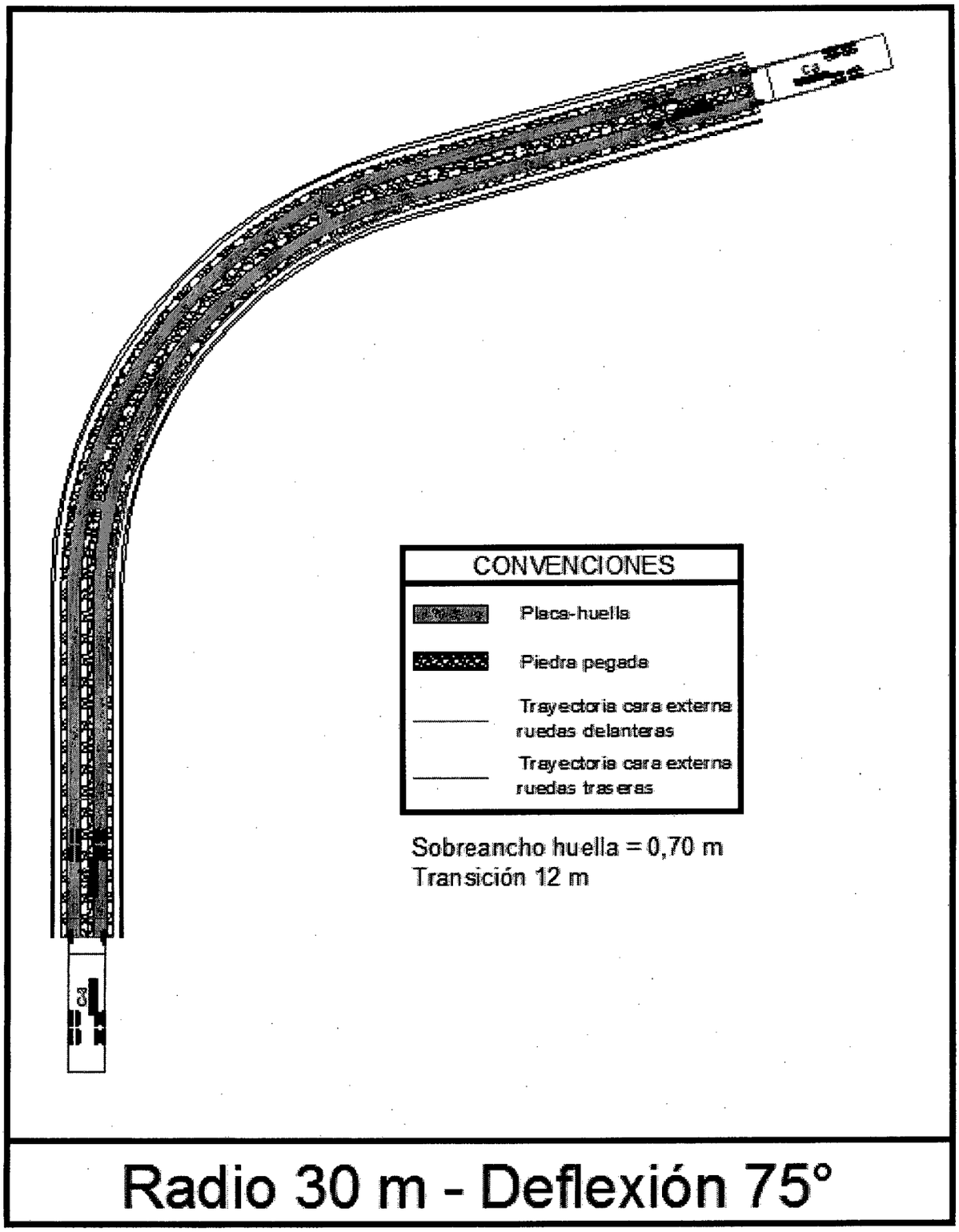
Radio 30 m - Deflexión 45°

0004401 17OCT2017



Radio 30 m - Deflexión 60°

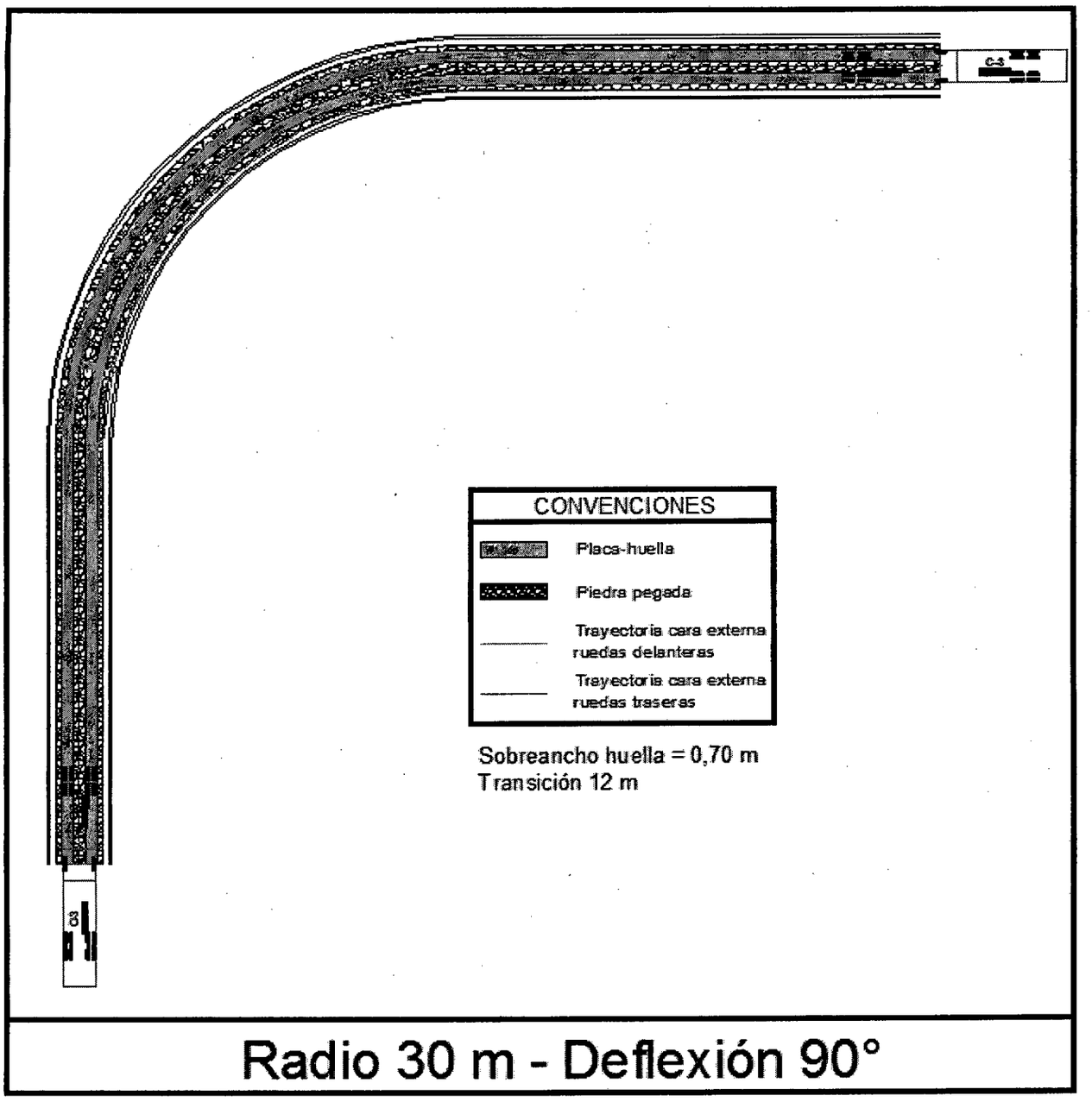
0004401 17 OCT 2017



Radio 30 m - Deflexión 75°

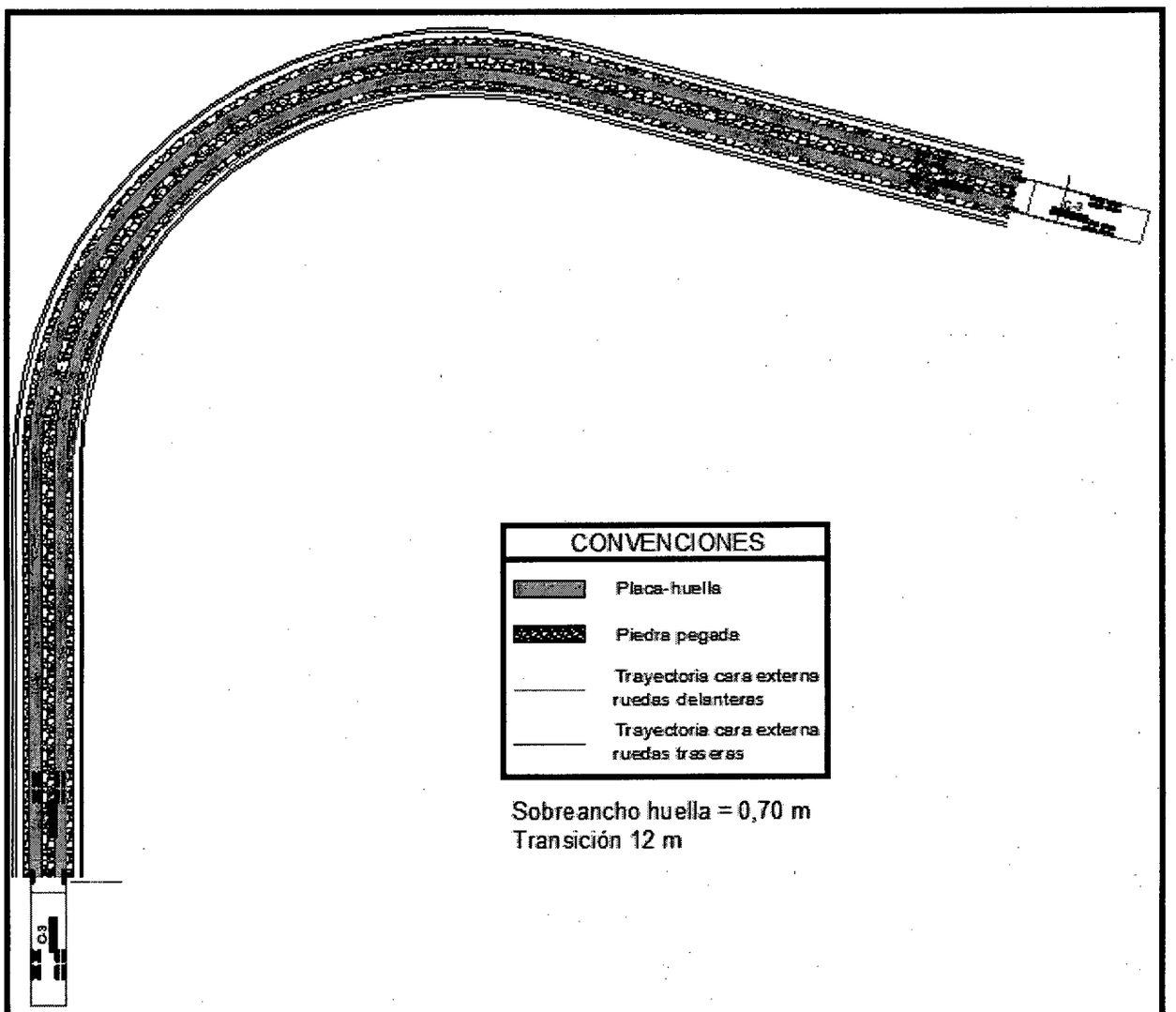
145

0004401 17 OCT 2017



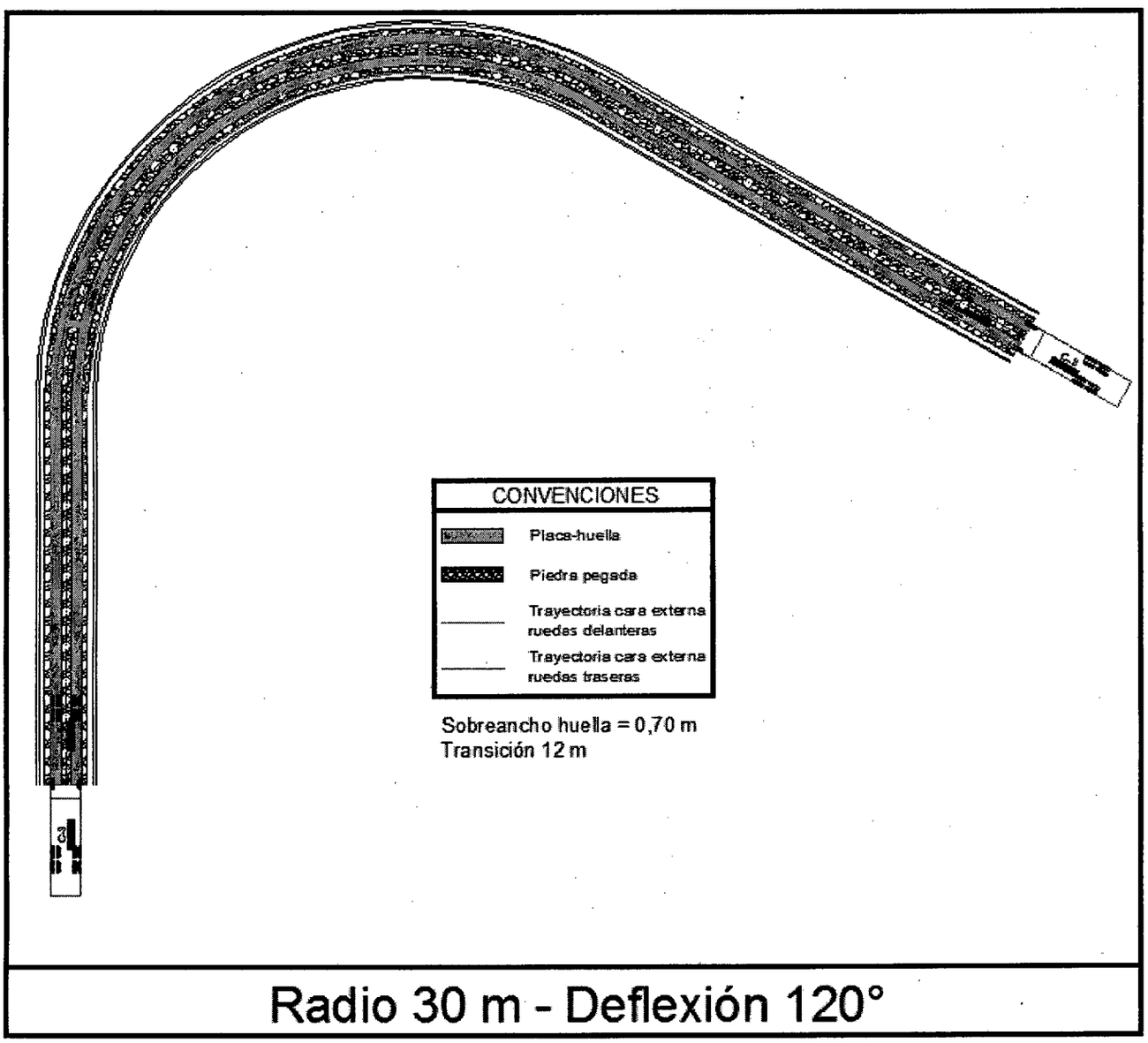
Radio 30 m - Deflexión 90°

0004401 17 OCT 2017



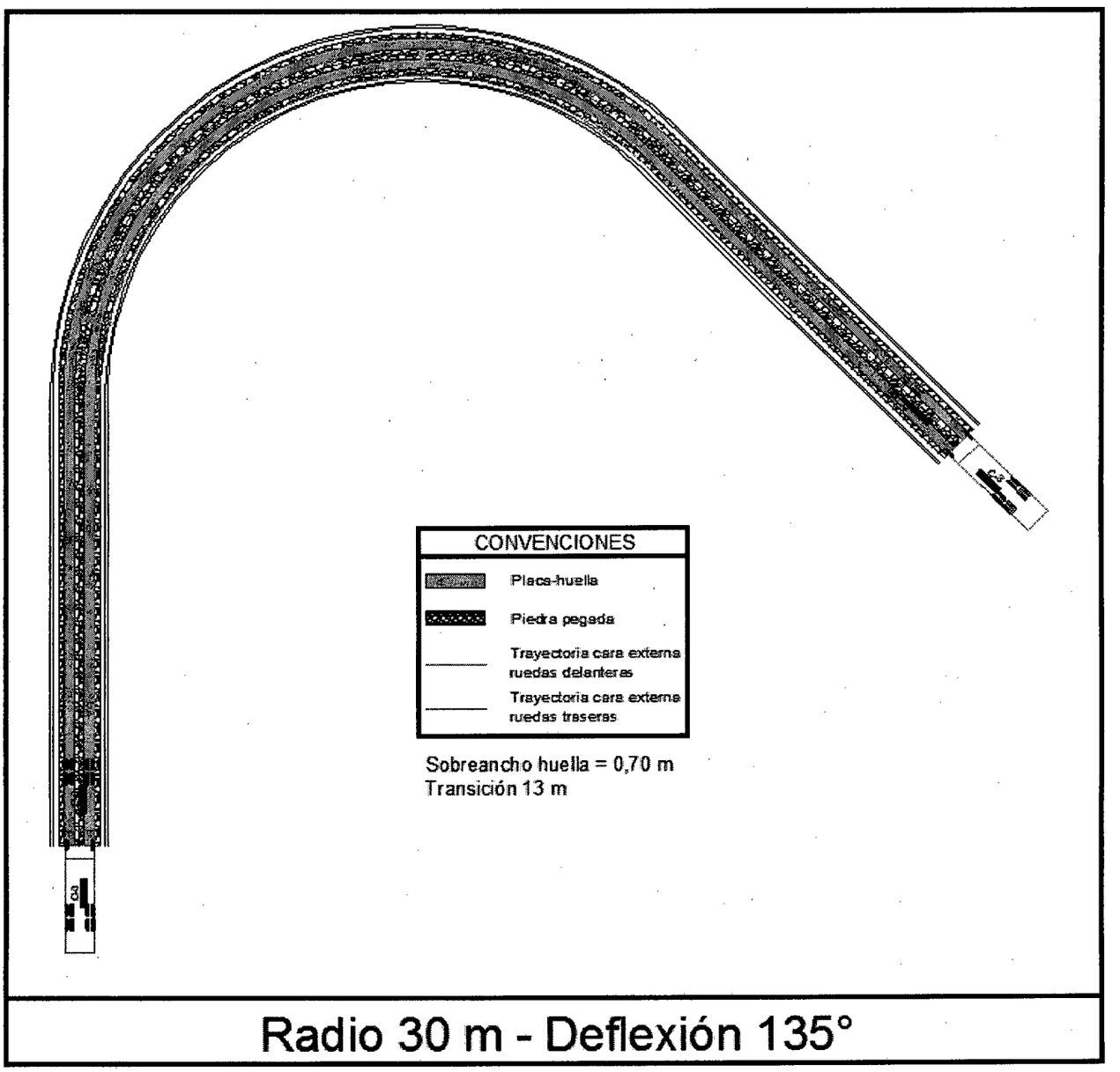
Radio 30 m - Deflexión 105°

0004401 17OCT2017



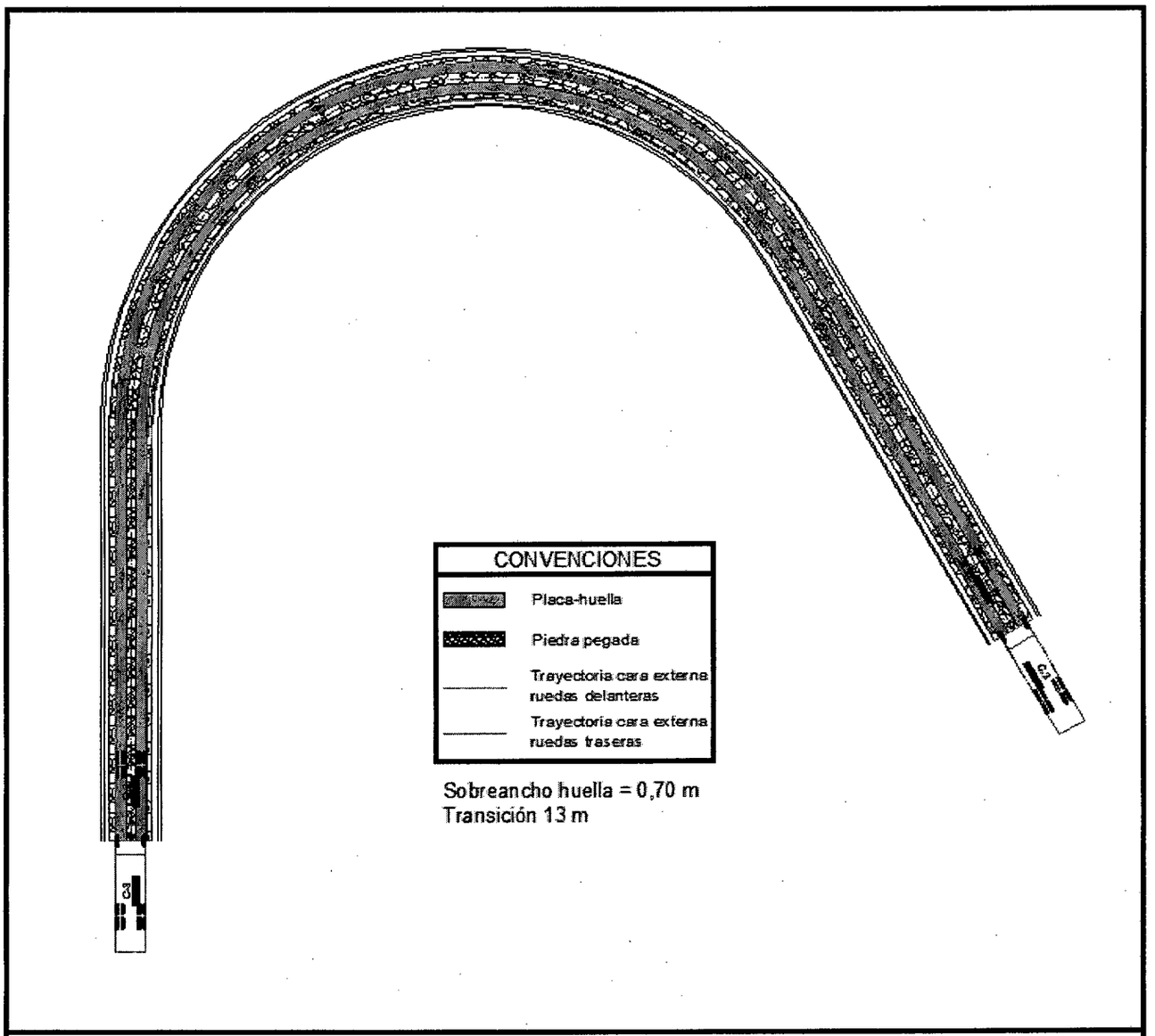
Radio 30 m - Deflexión 120°

0004401 17OCT2017



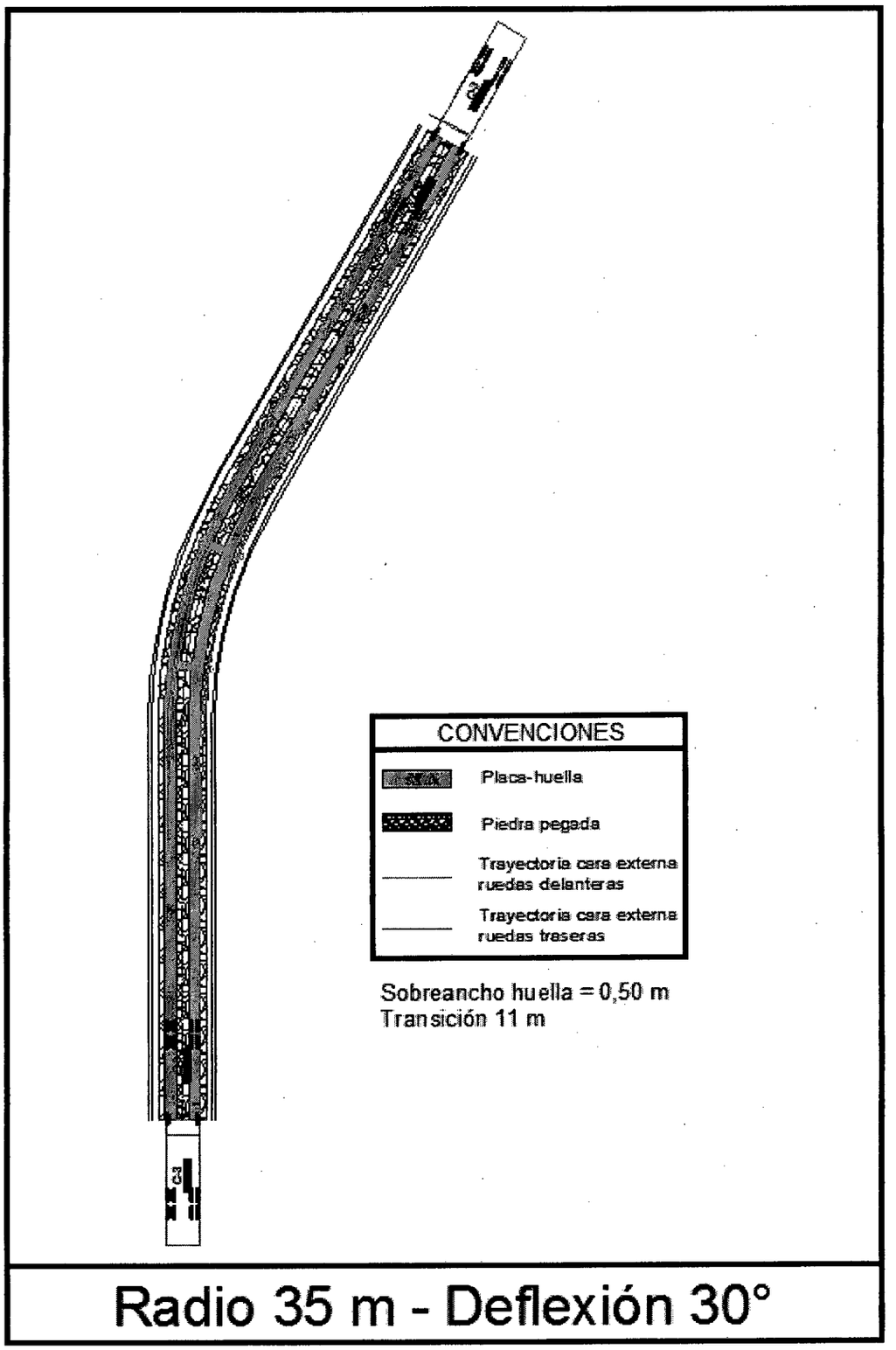
Radio 30 m - Deflexión 135°

0004401 17OCT2017



Radio 30 m - Deflexión 150°

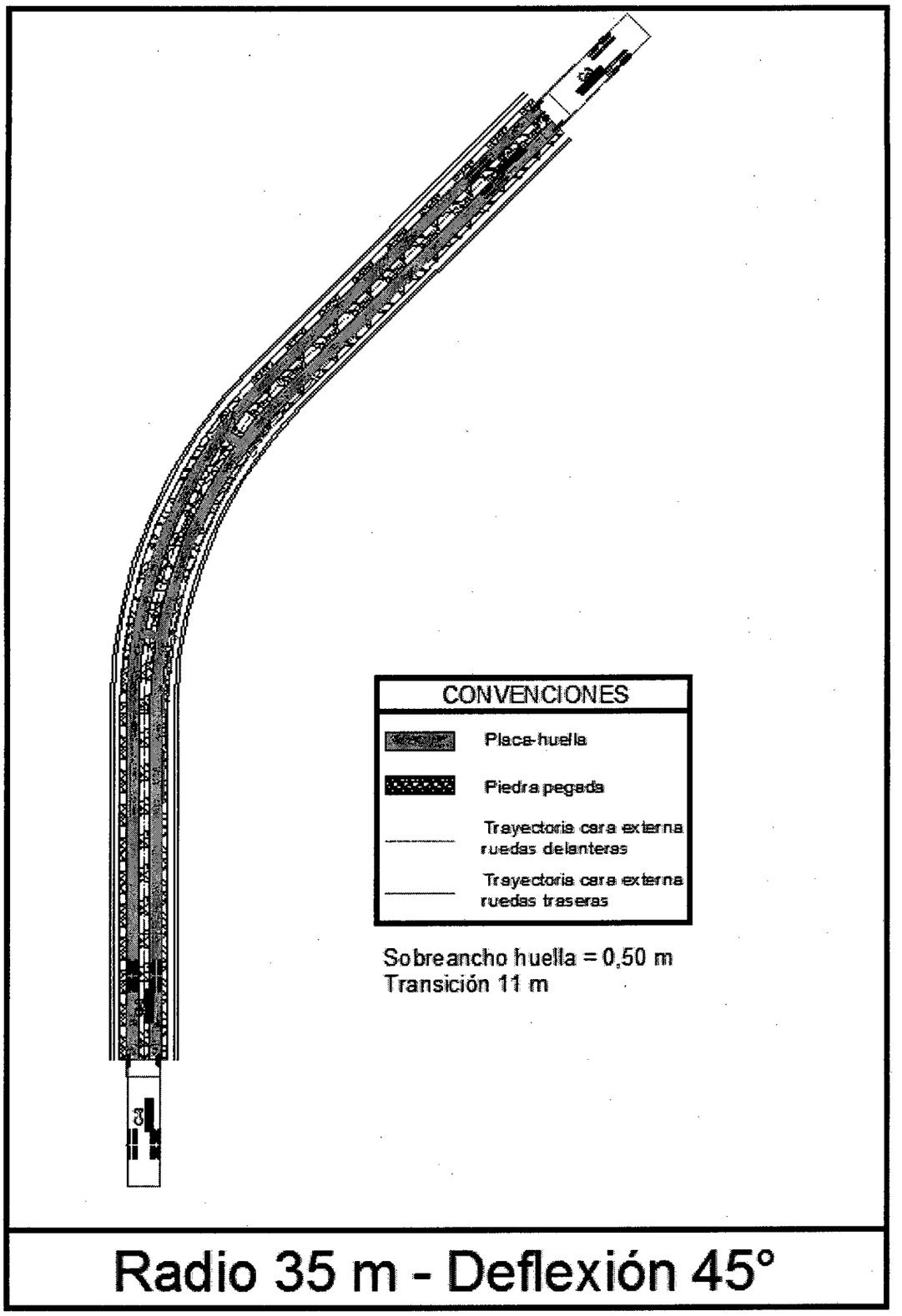
0004401 17OCT2017



Radio 35 m - Deflexión 30°

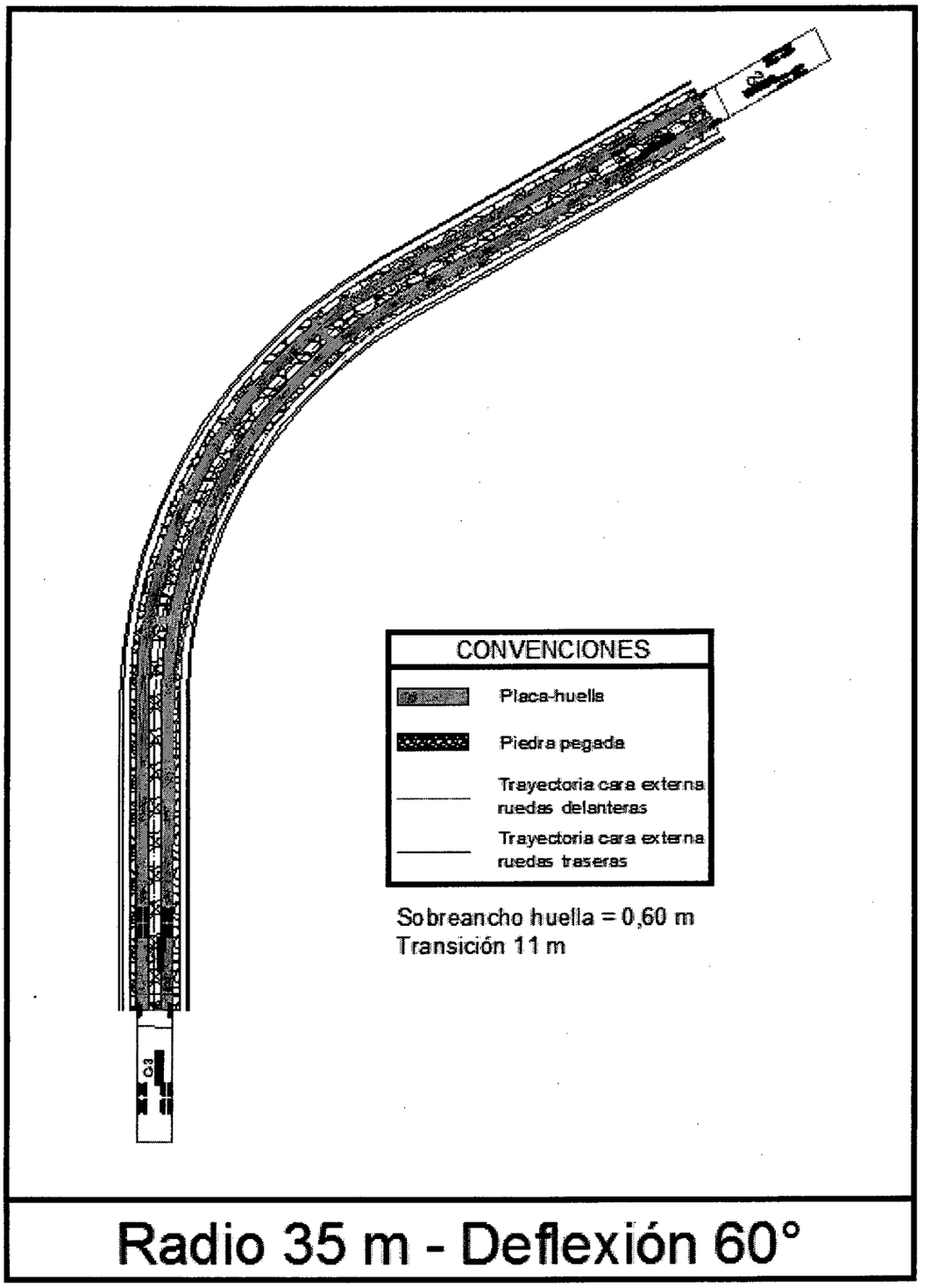
JSL

0004401 17OCT2017



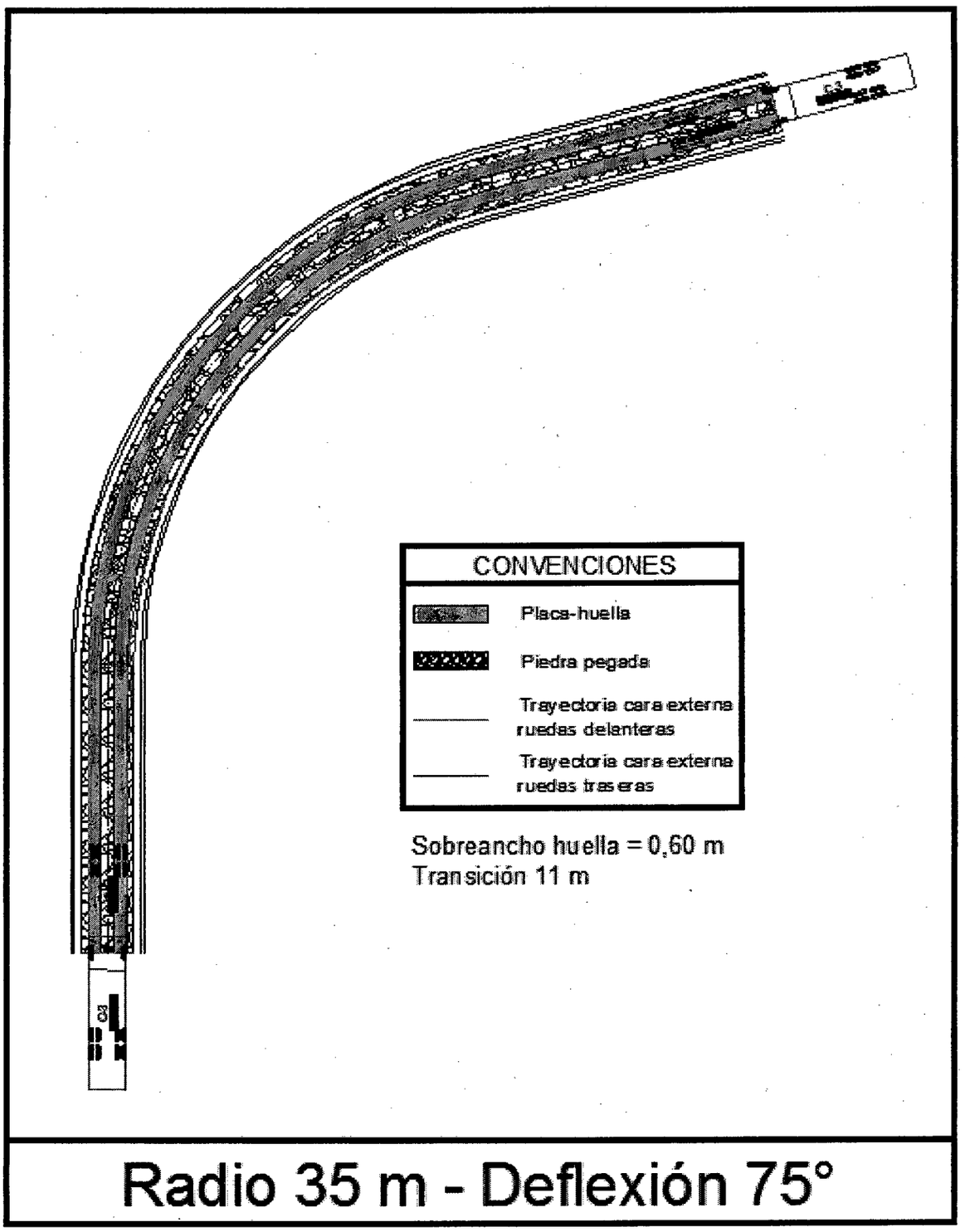
Radio 35 m - Deflexión 45°

0004401 17 OCT 2017



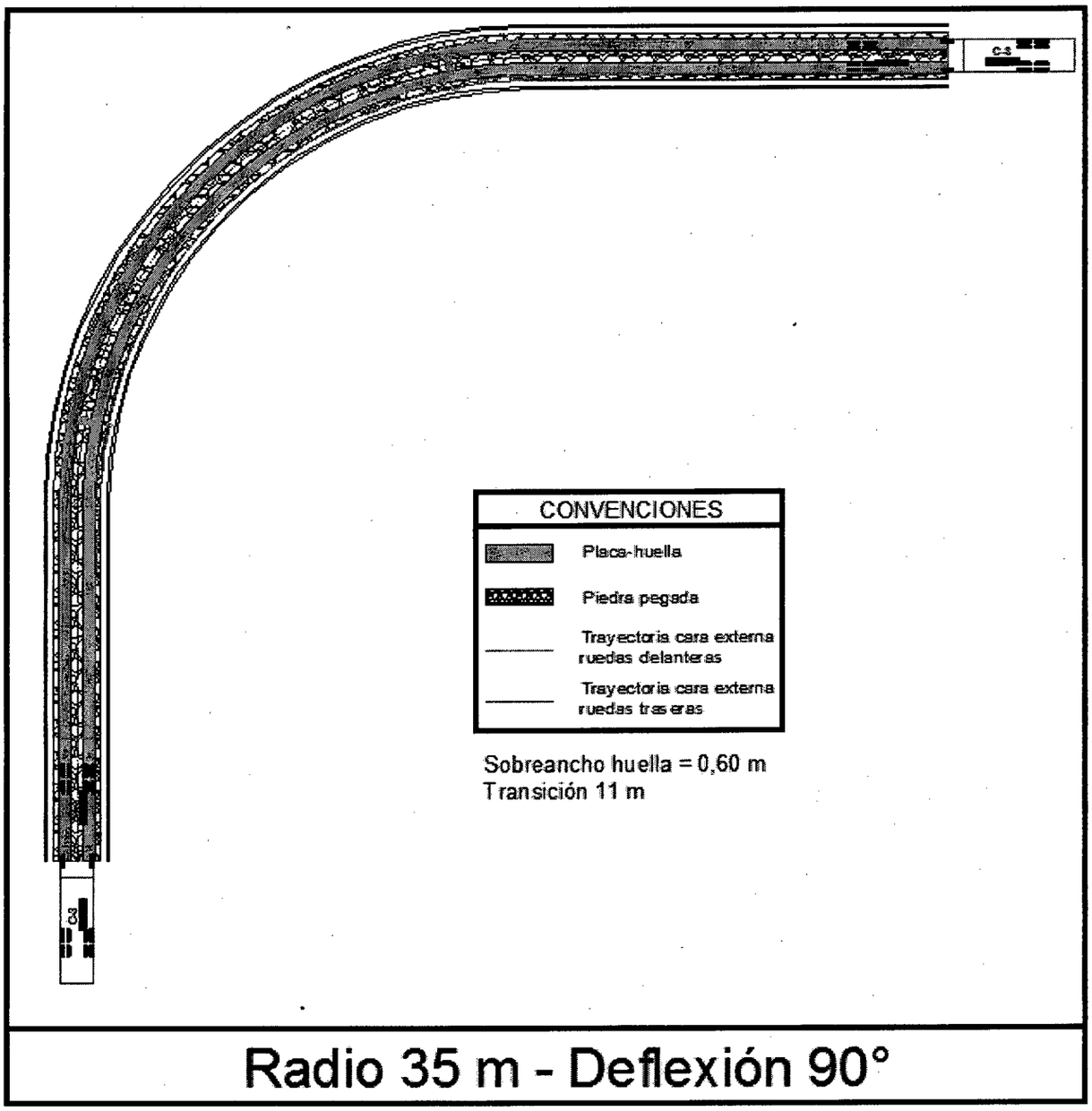
Radio 35 m - Deflexión 60°

0004401 17OCT2017



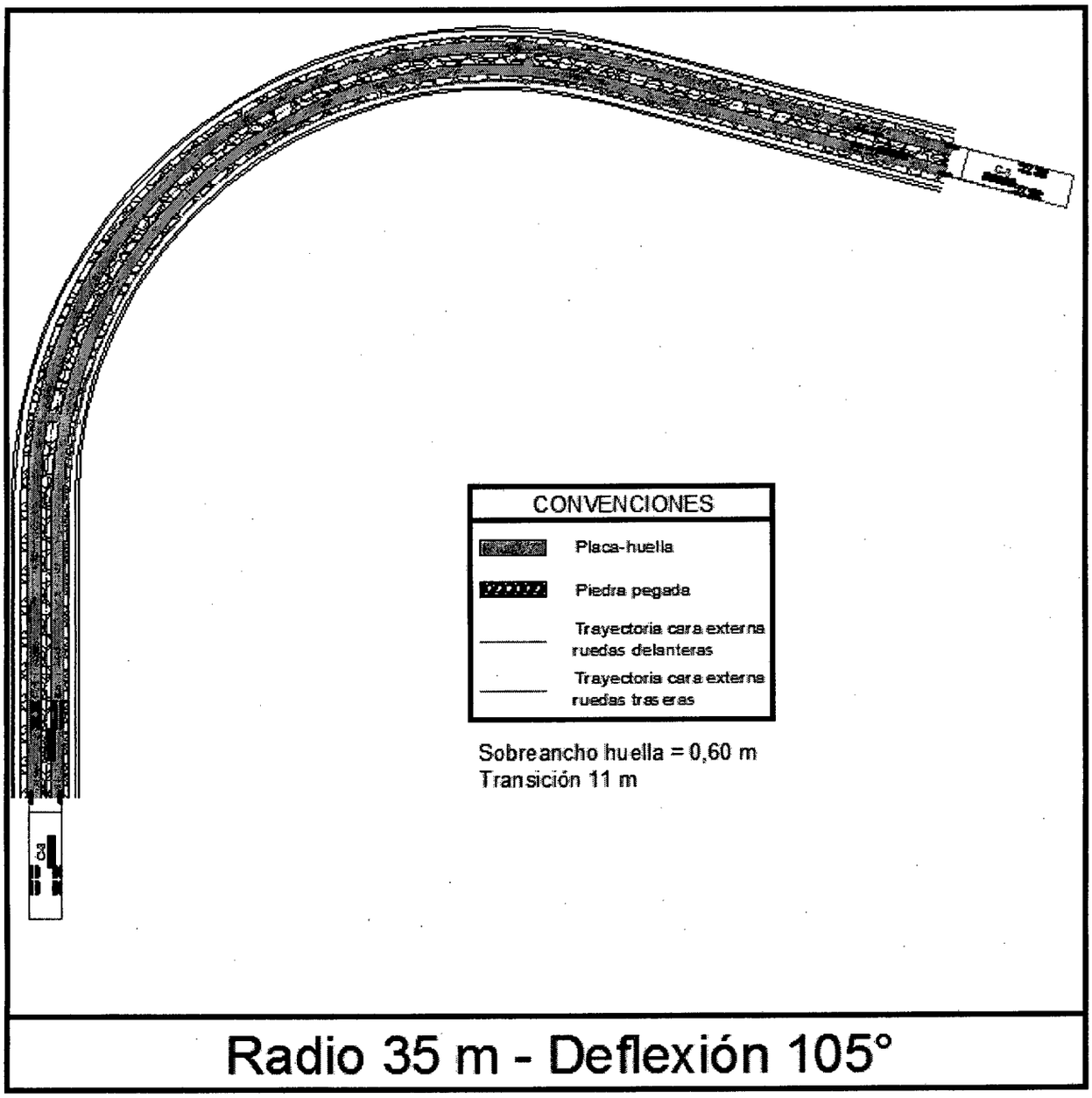
Radio 35 m - Deflexión 75°

0004401 17OCT2017



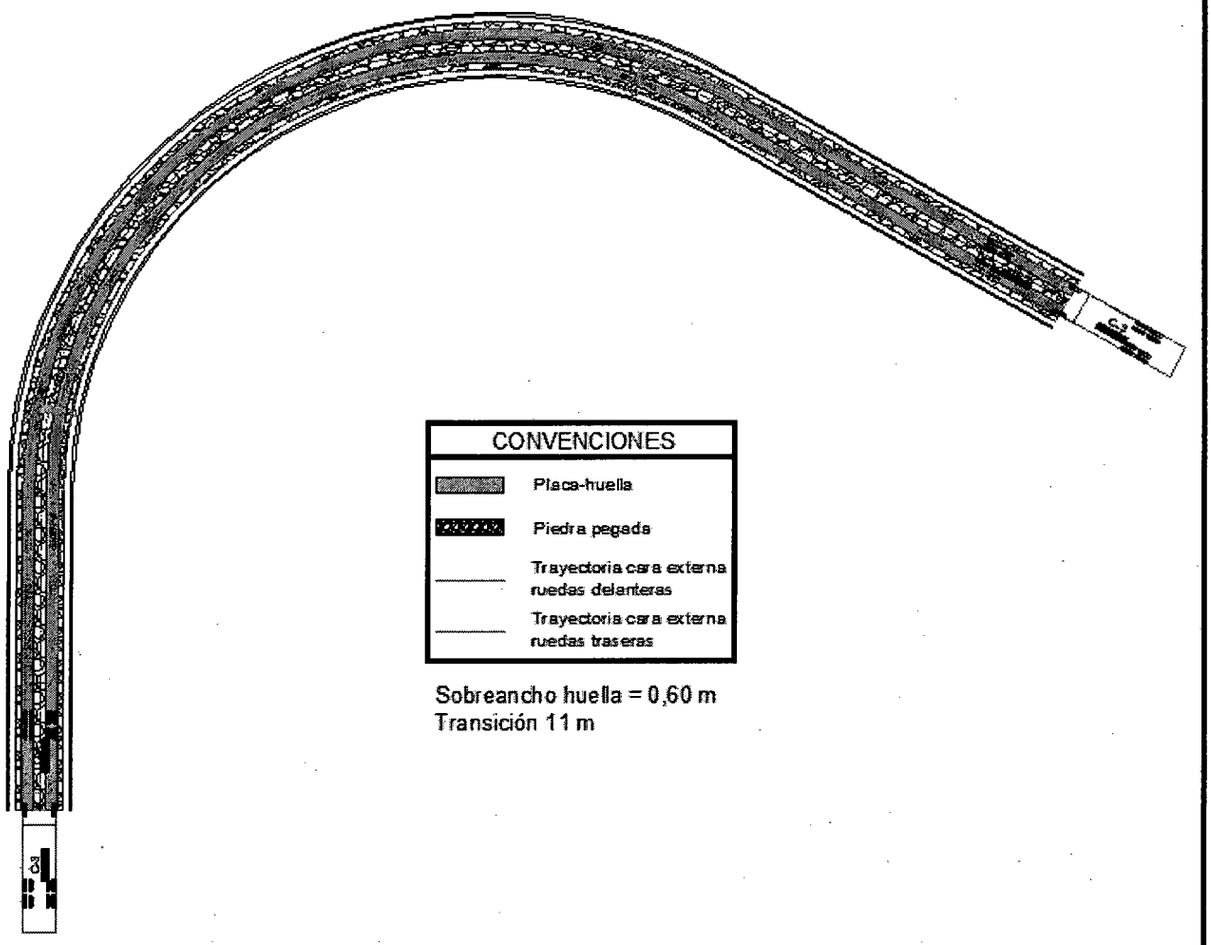
Radio 35 m - Deflexión 90°

0004401 17OCT2017



Radio 35 m - Deflexión 105°

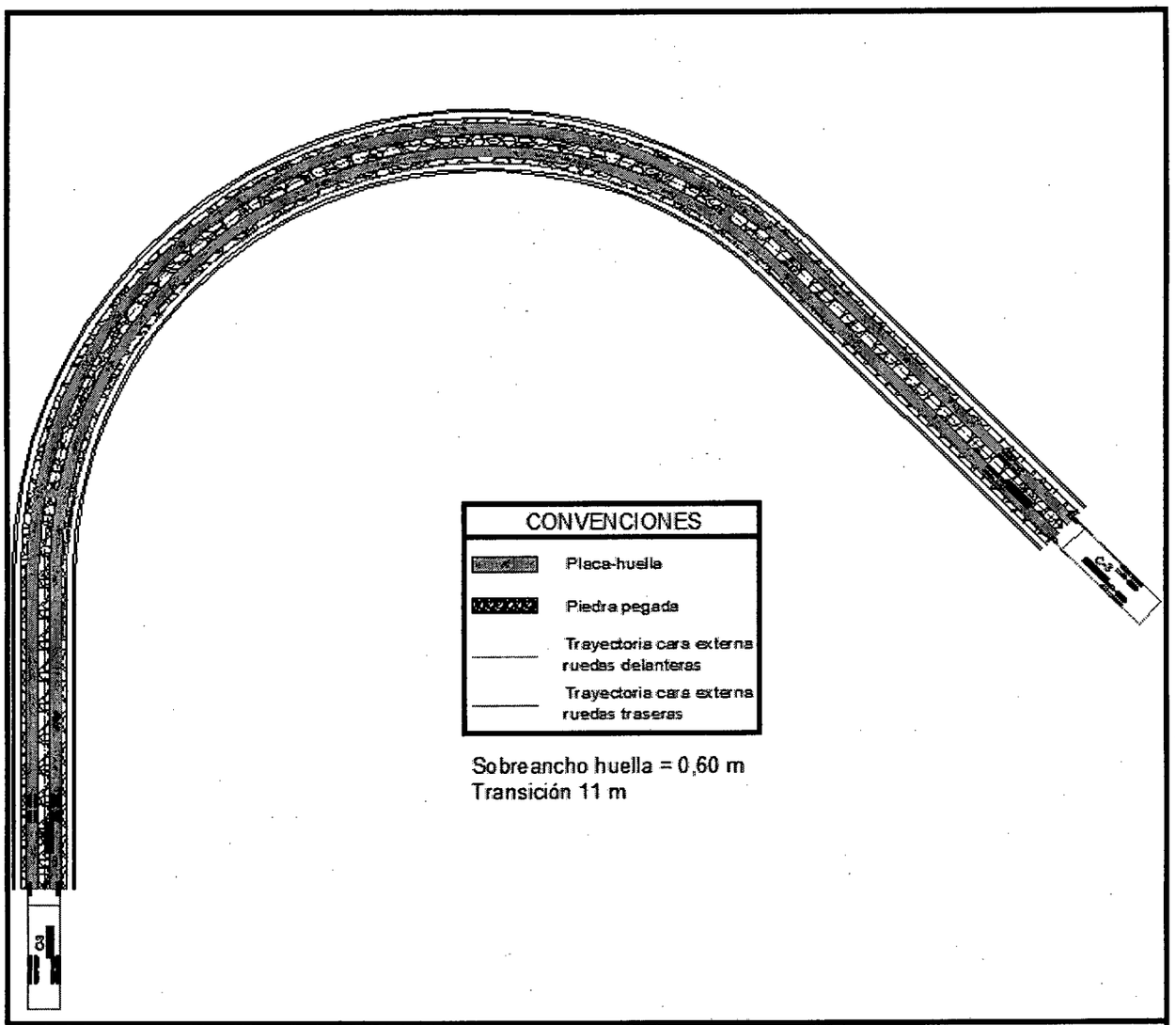
0004401 17OCT2017



Radio 35 m - Deflexión 120°

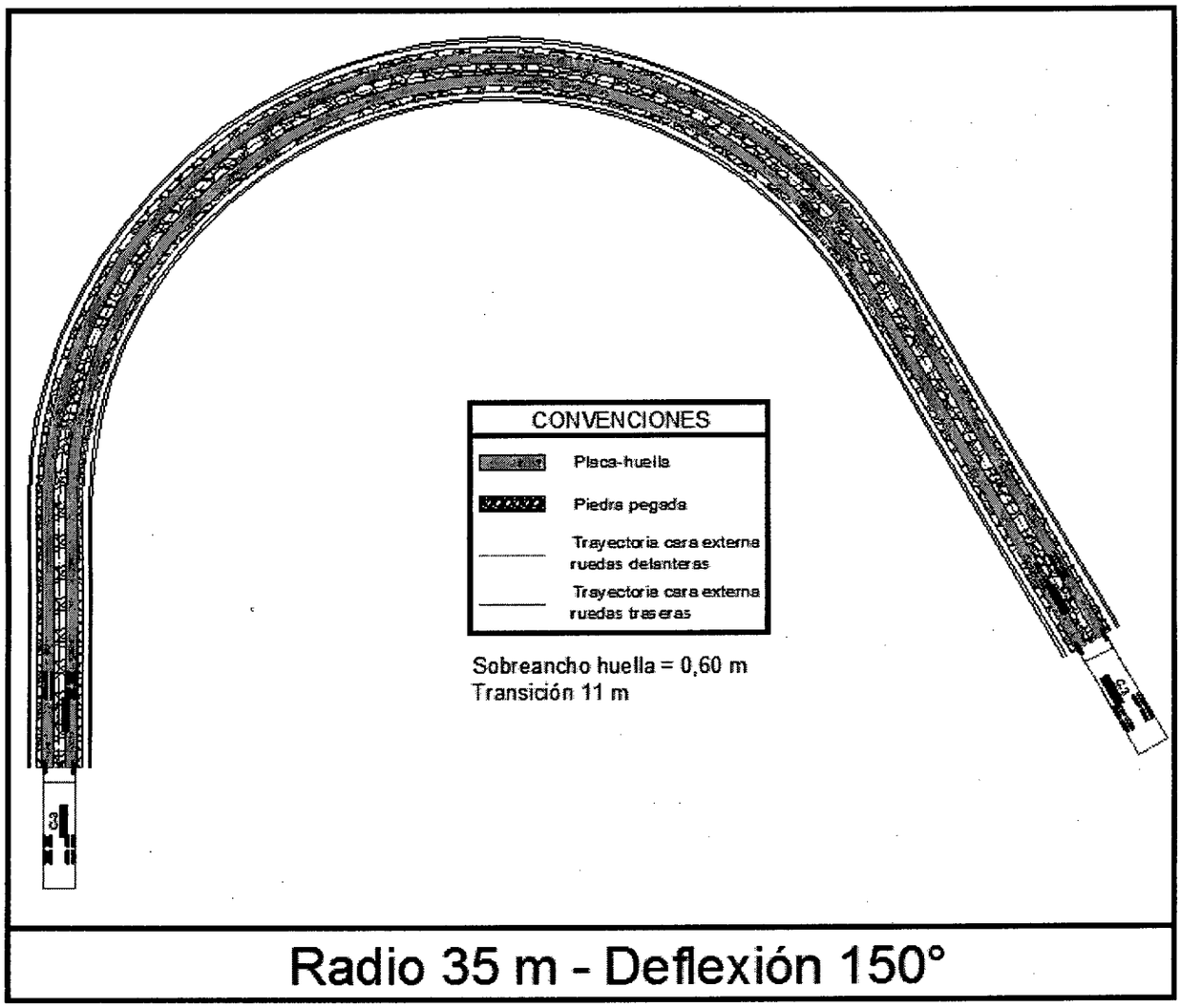
157

0004401 17OCT2017



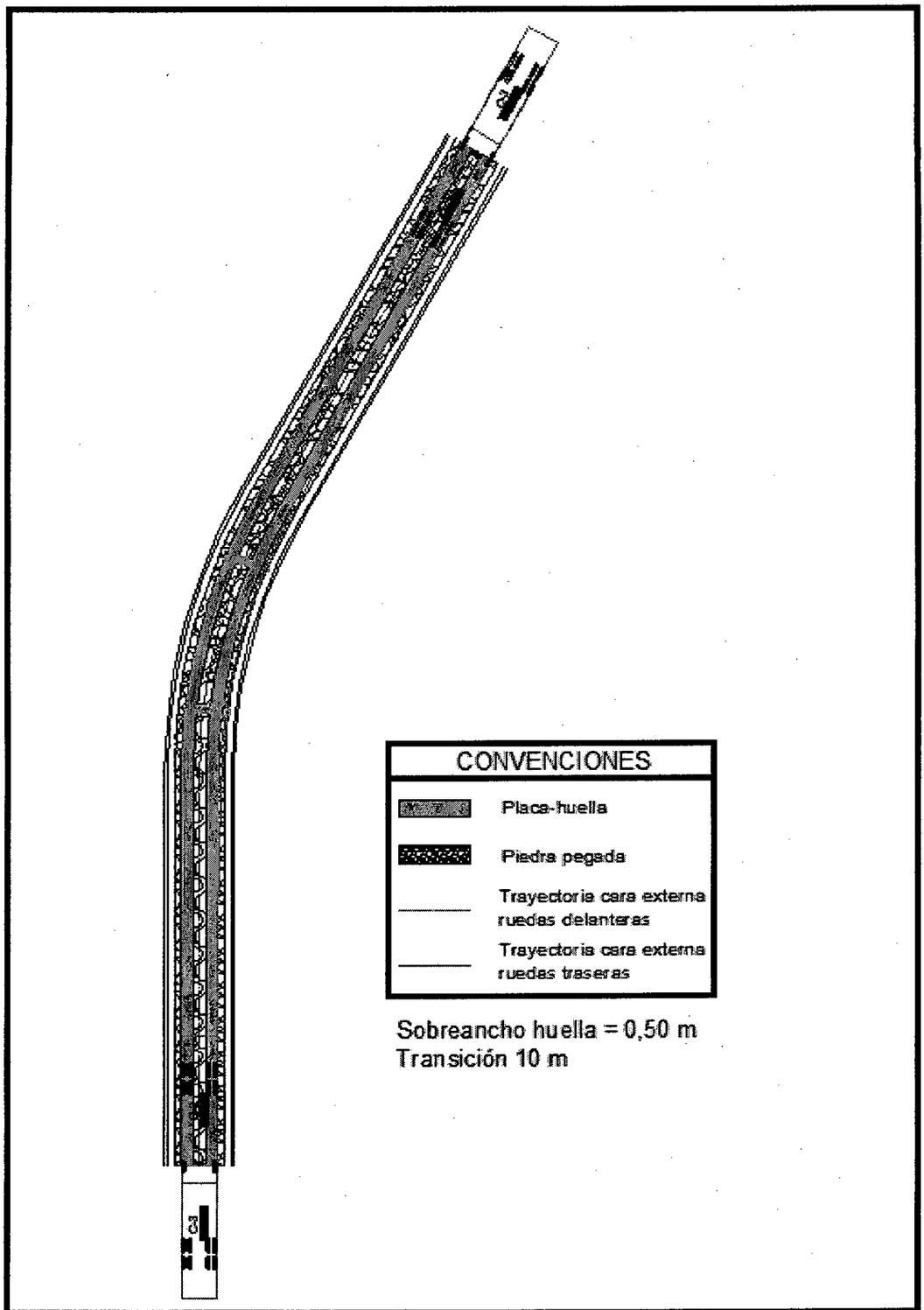
Radio 35 m - Deflexión 135°

0004401 17OCT2017



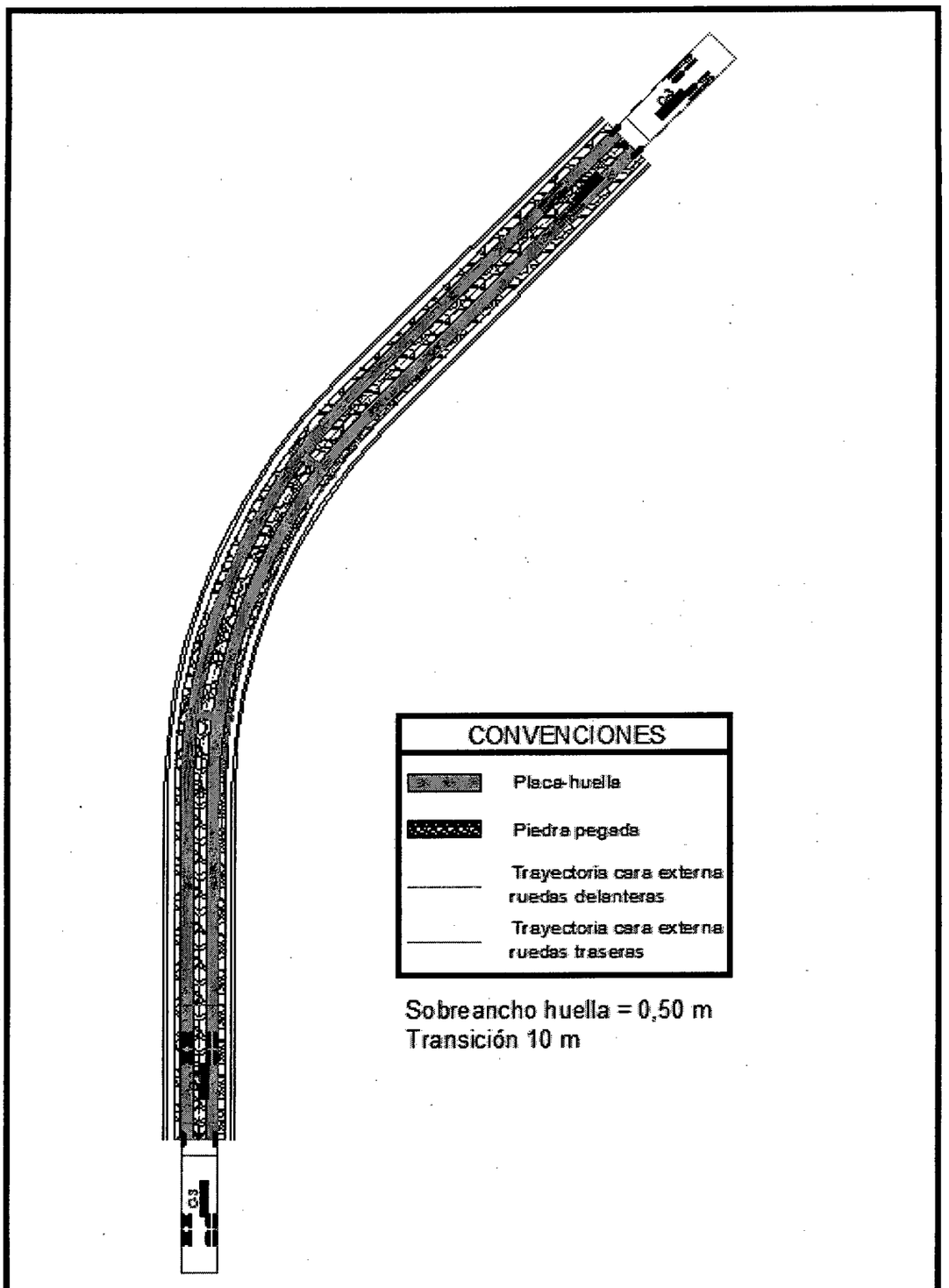
Radio 35 m - Deflexión 150°

0004401 17OCT2017



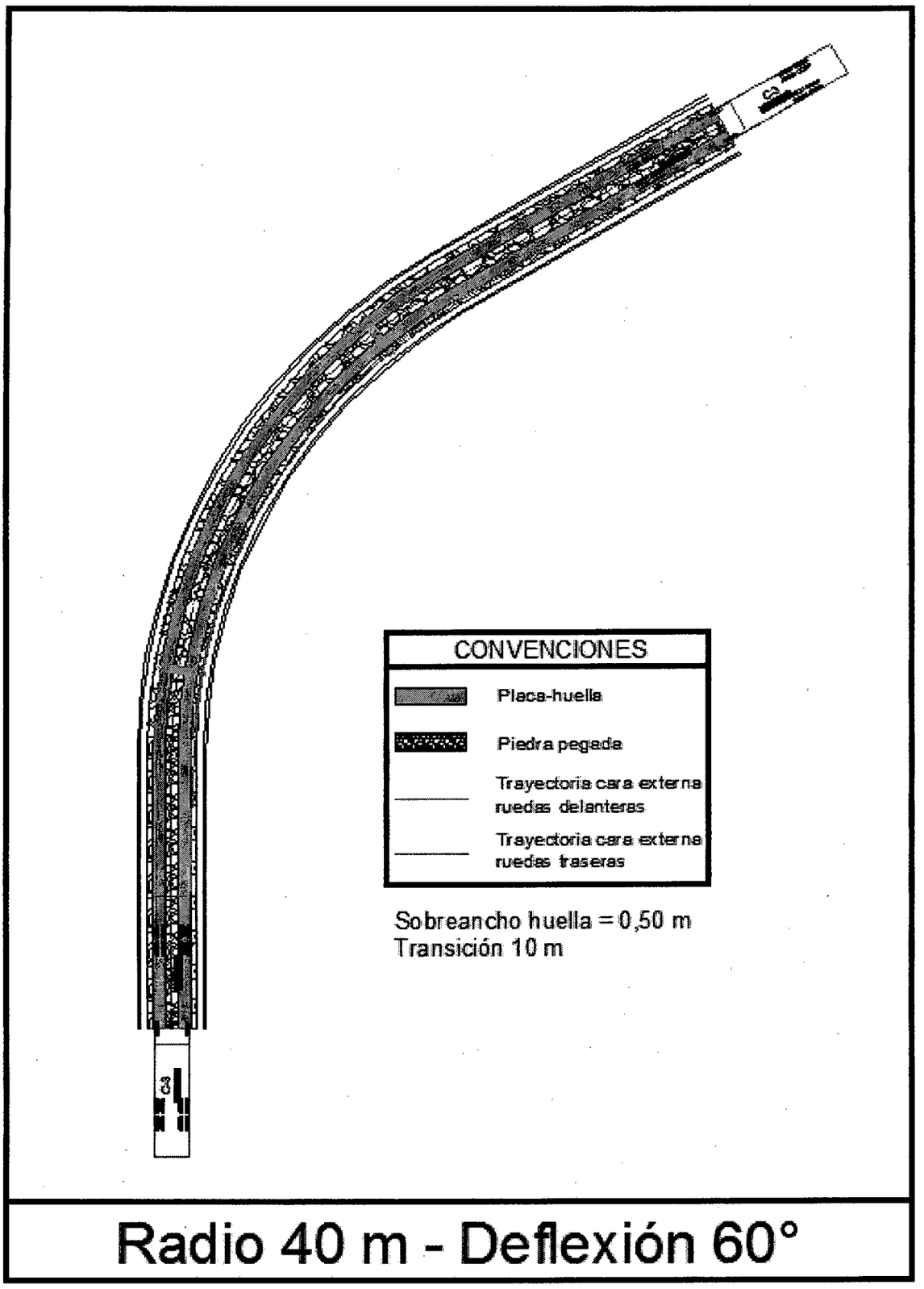
Radio 40 m - Deflexión 30°

0004401 17OCT2017



Radio 40 m - Deflexión 45°

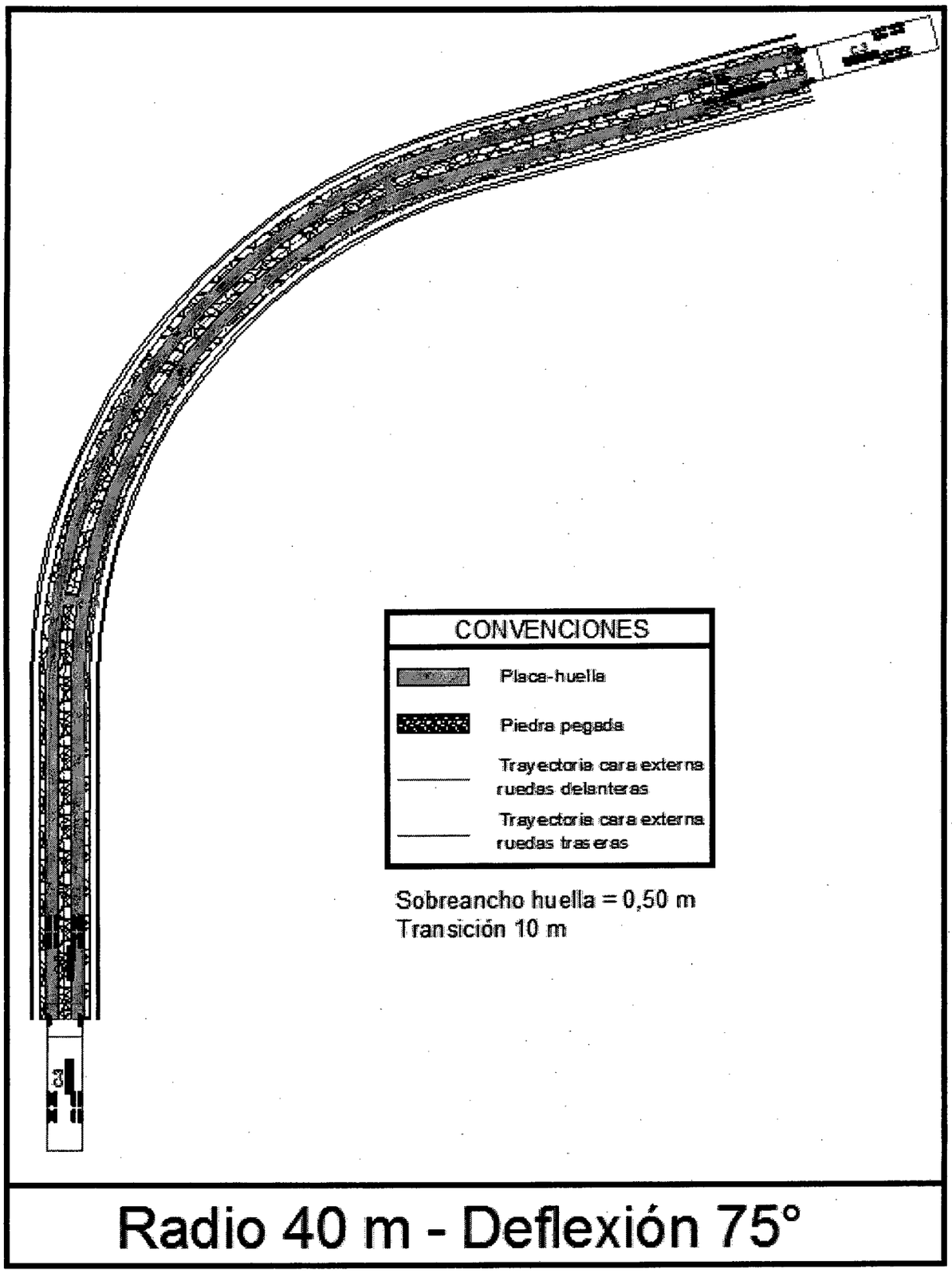
0004401 17OCT2017



Radio 40 m - Deflexión 60°

162

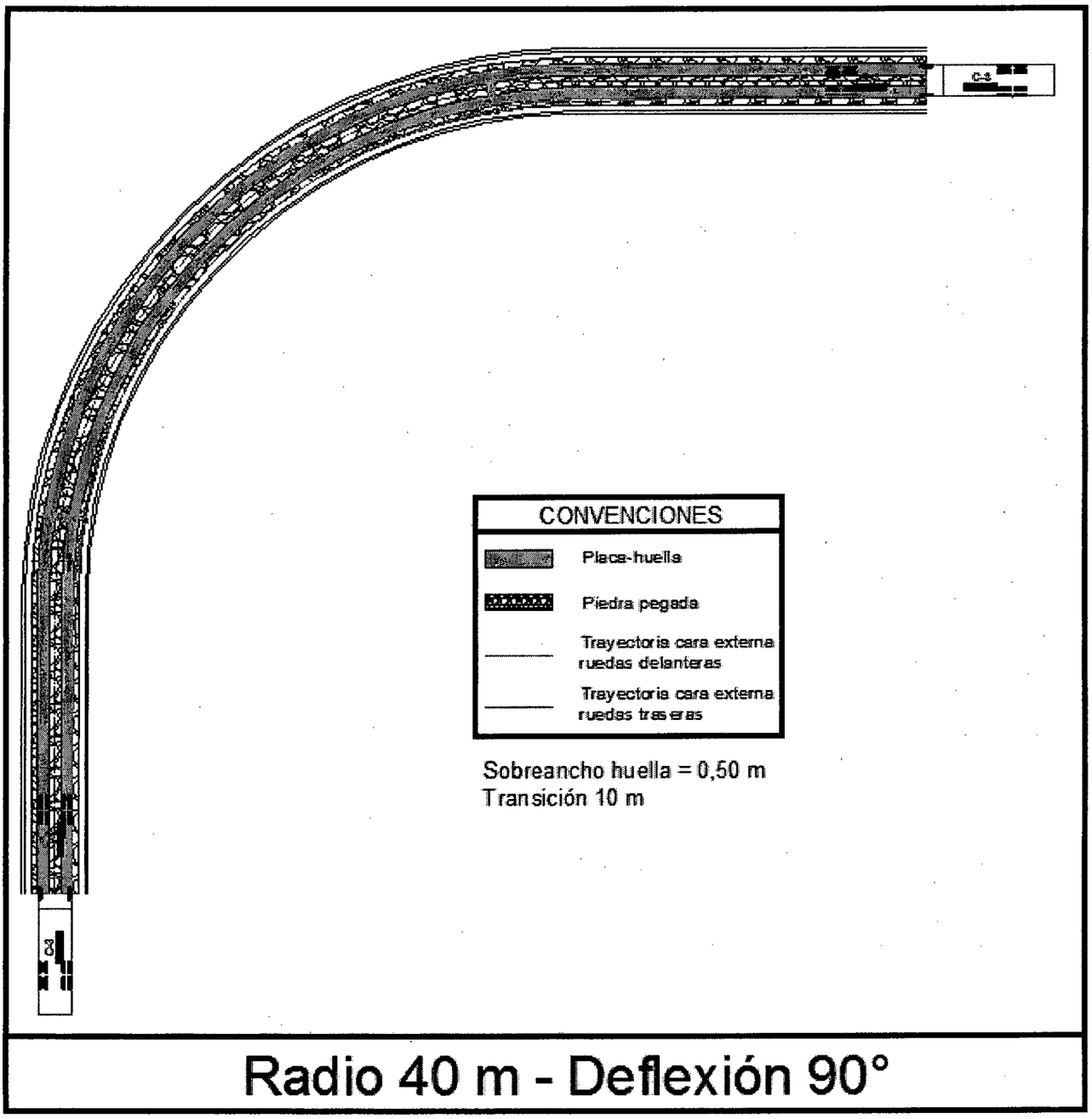
000440 17 OCT 2017



Radio 40 m - Deflexión 75°

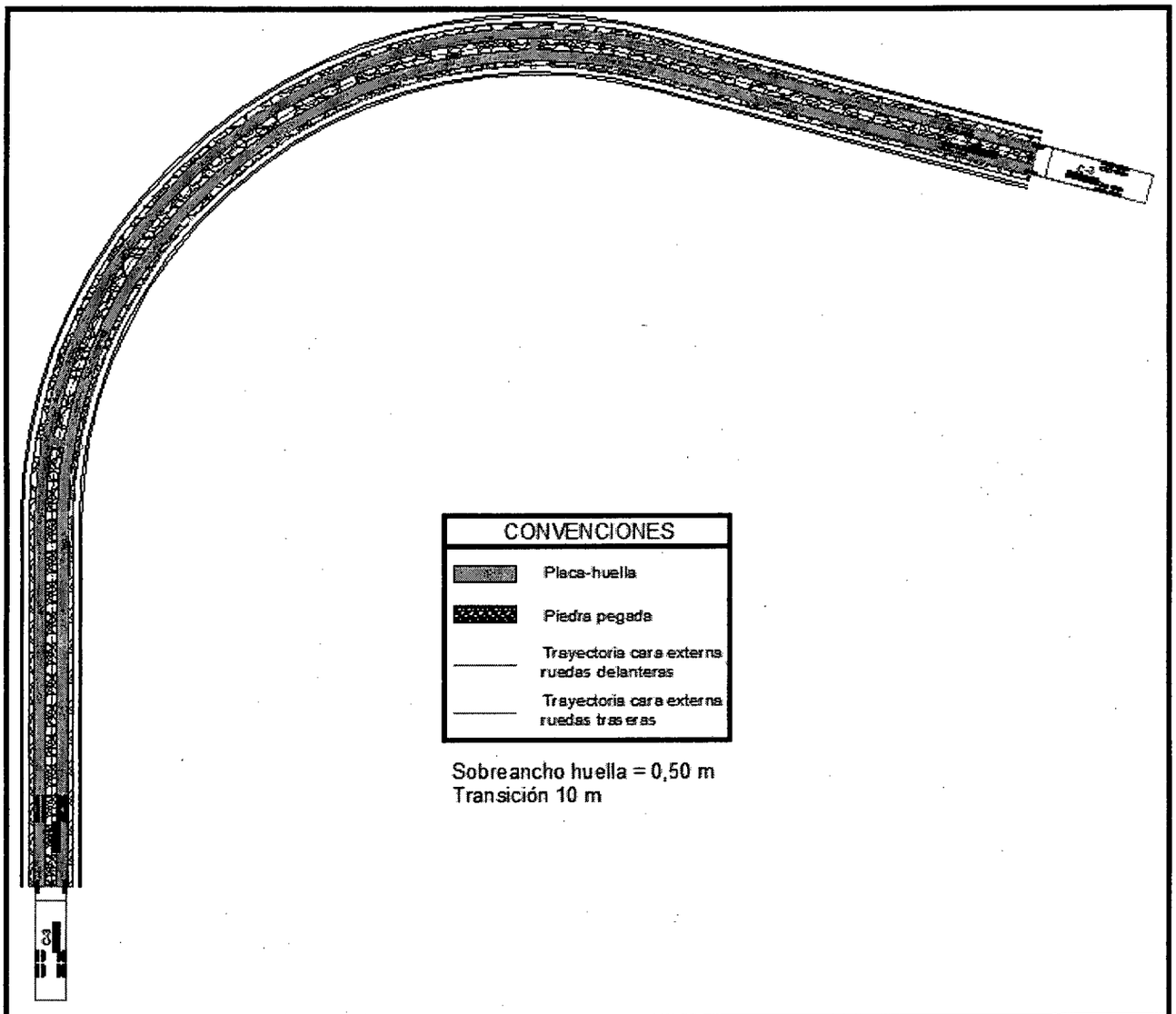
163

0004401 17OCT2017



Radio 40 m - Deflexión 90°

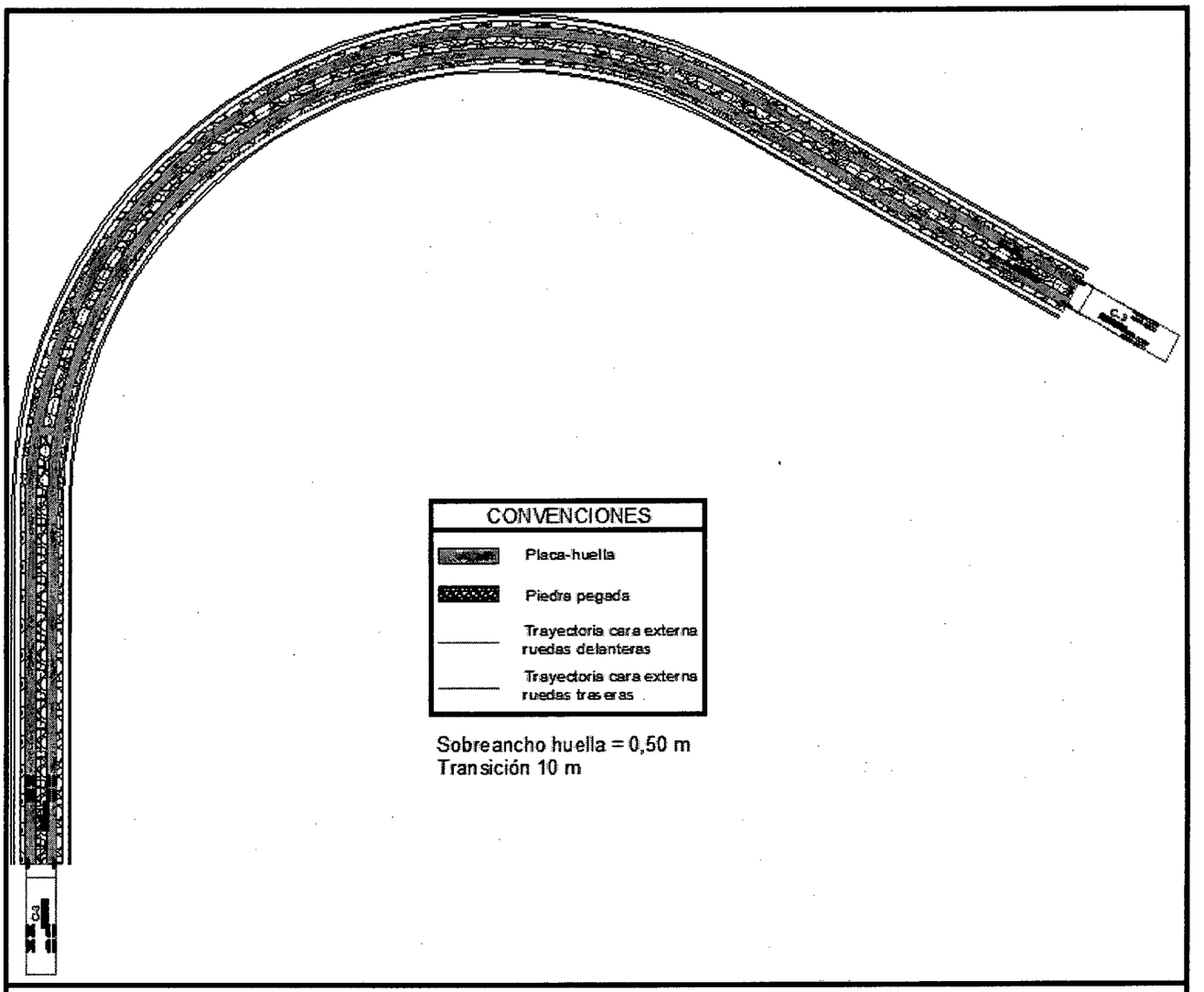
0004401 17 OCT 2017



Radio 40 m - Deflexión 105°

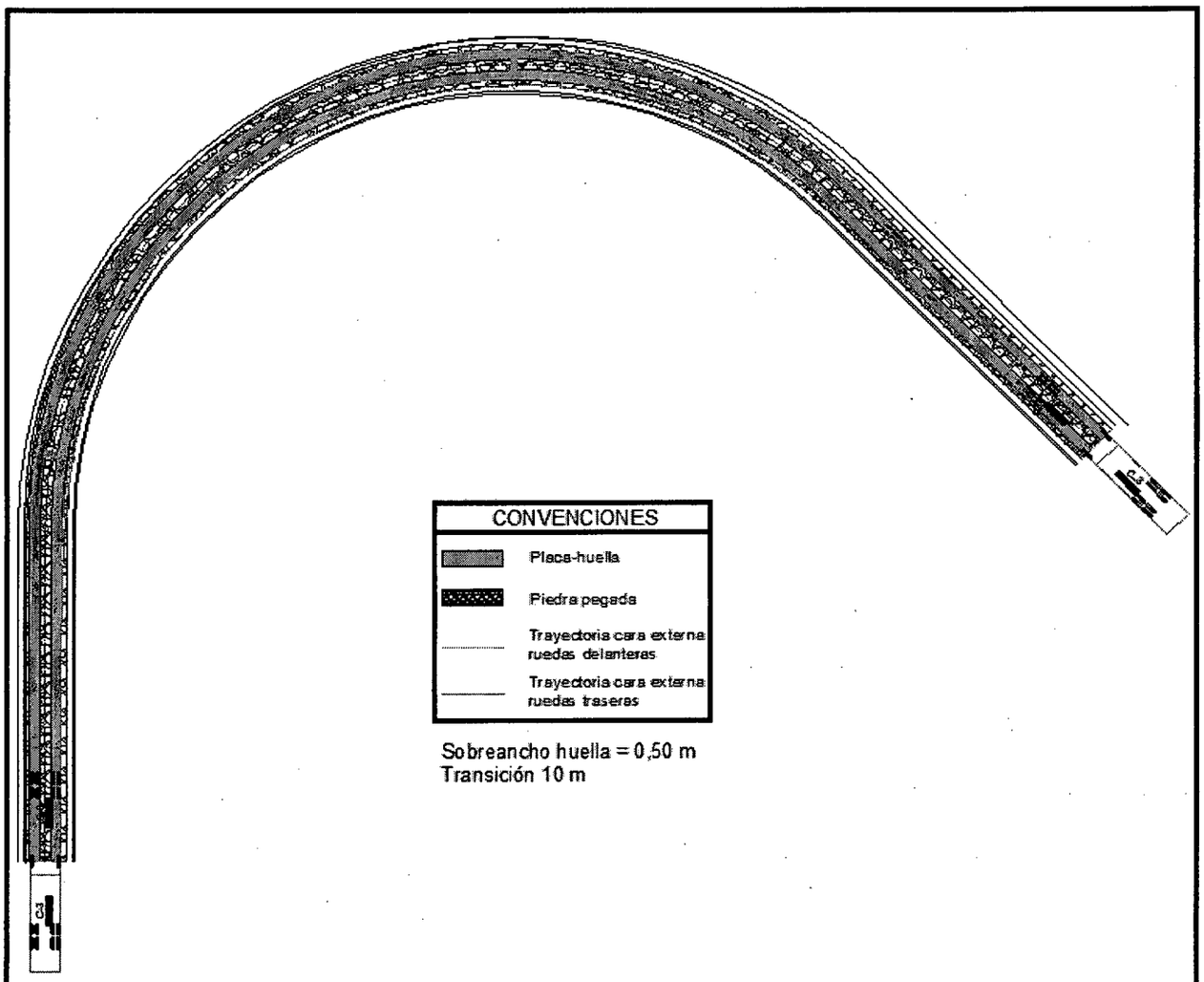
165

0004401 17OCT2017



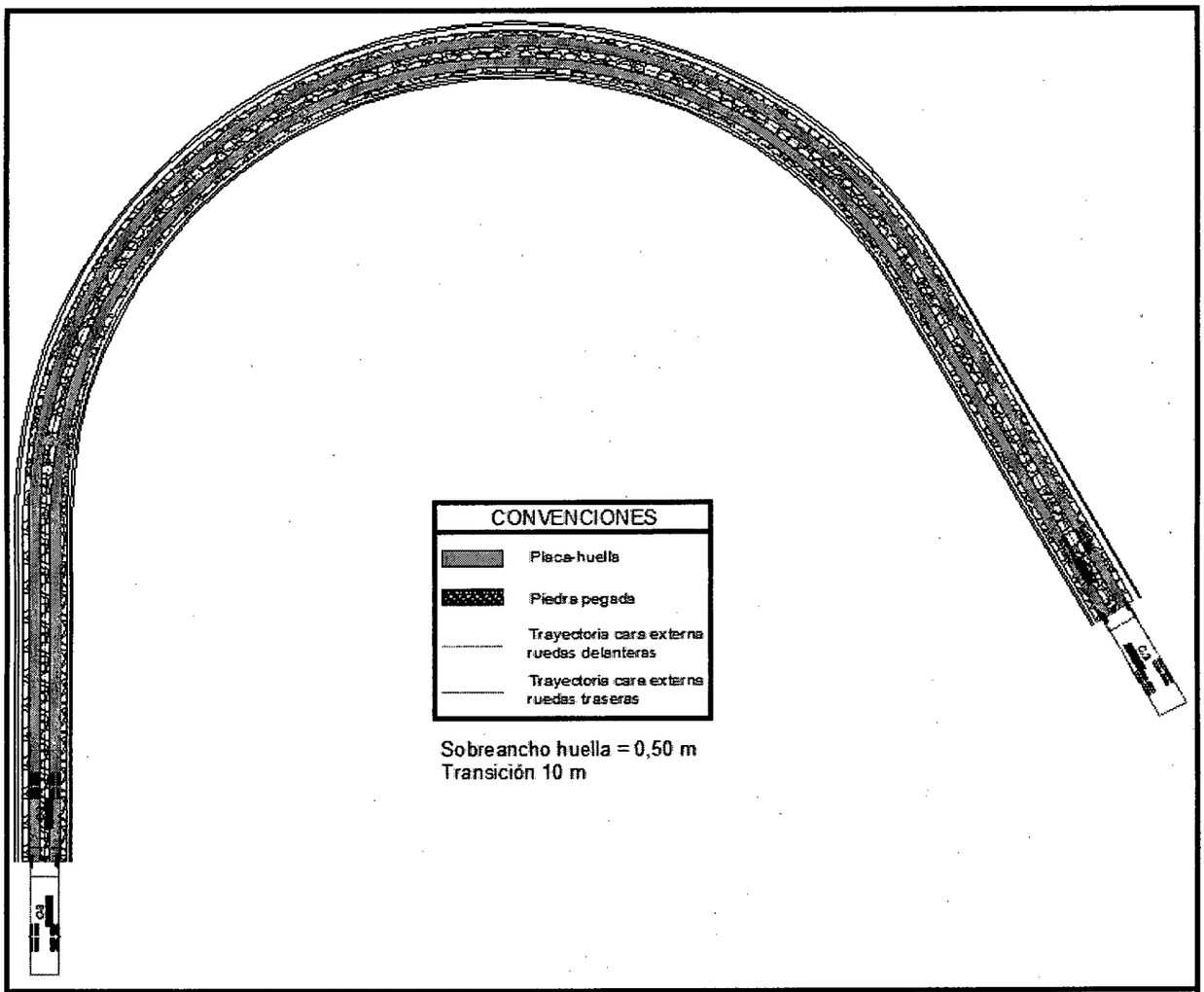
Radio 40 m - Deflexión 120°

0004401 17OCT2017



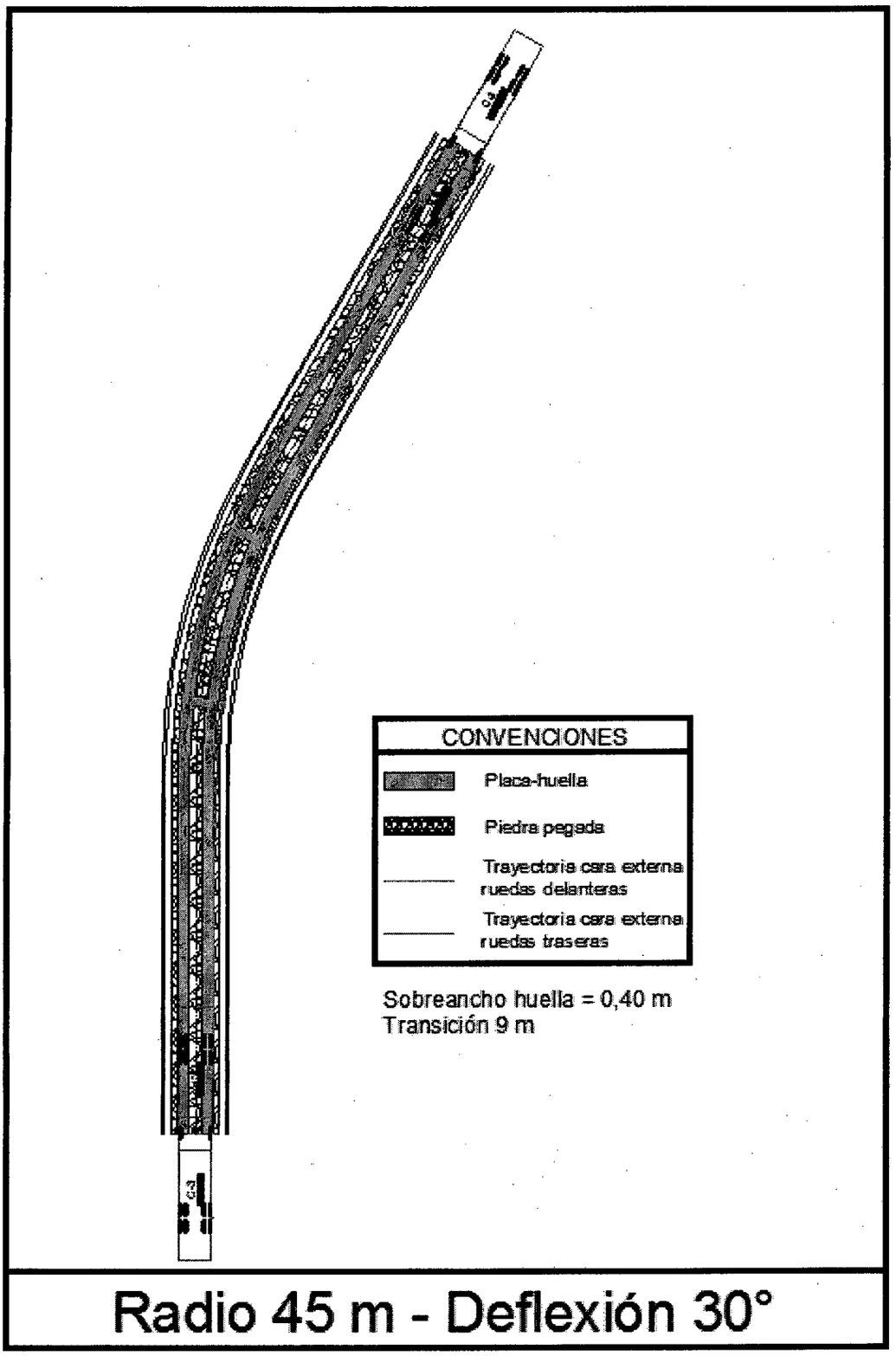
Radio 40 m - Deflexión 135°

0004401 17OCT2017



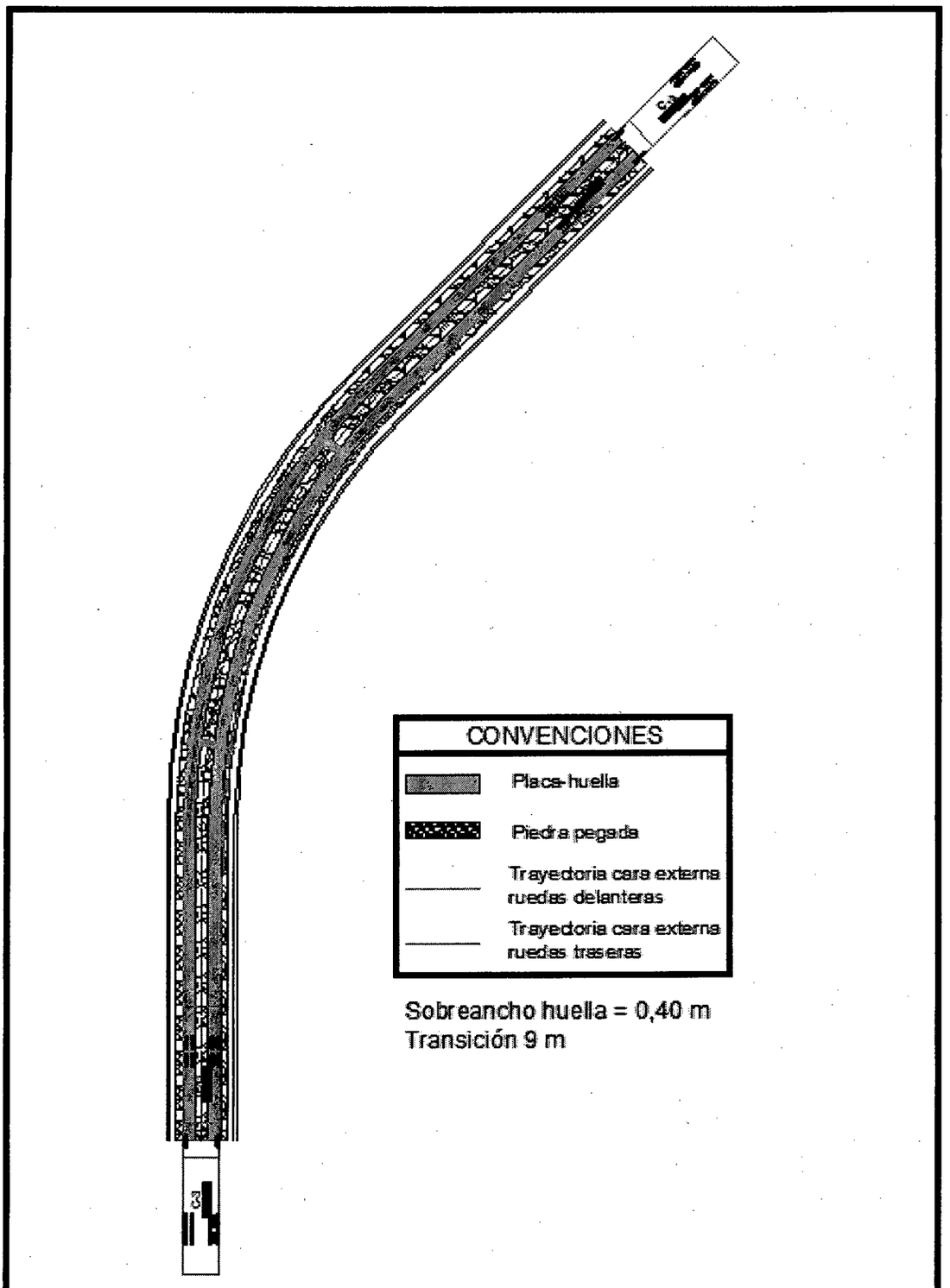
Radio 40 m - Deflexión 150°

0004401 17OCT2017



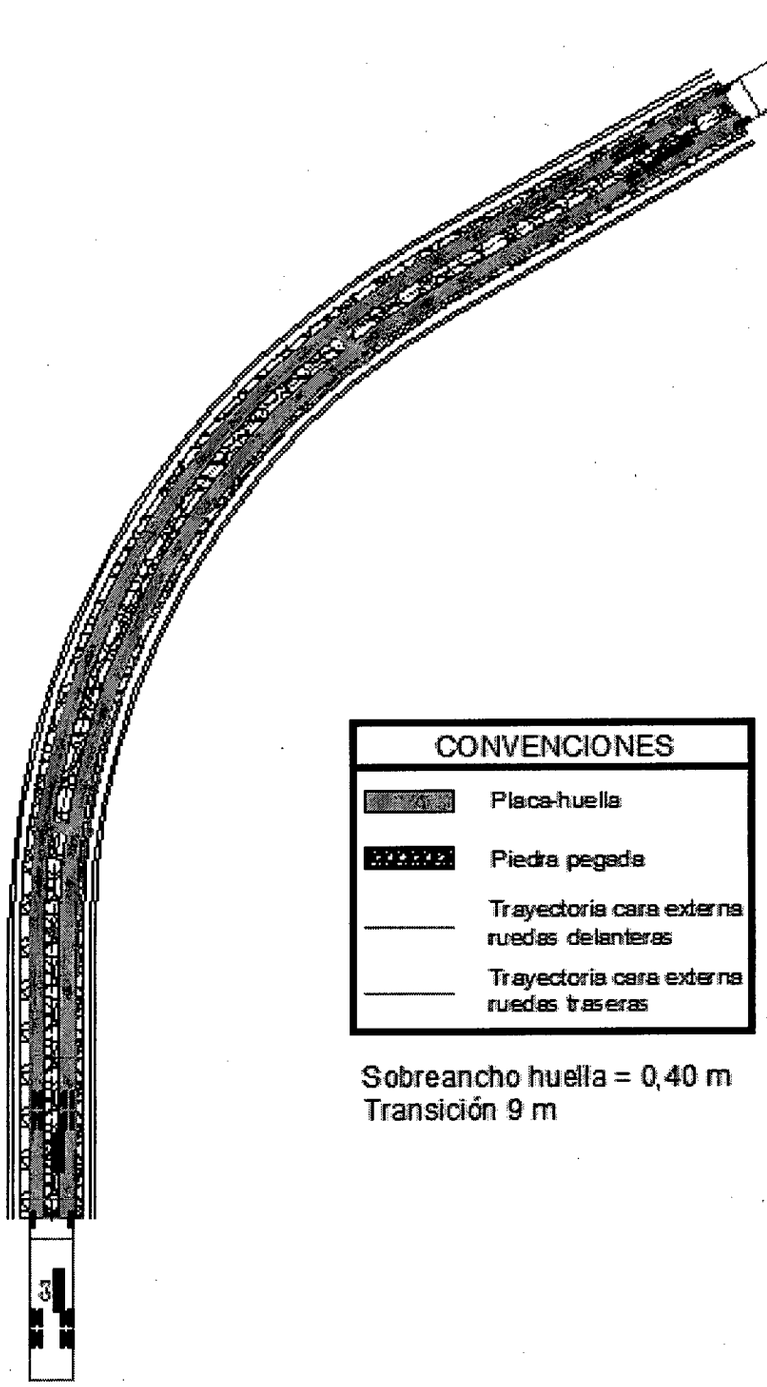
Radio 45 m - Deflexión 30°

0004401 17 OCT 2017



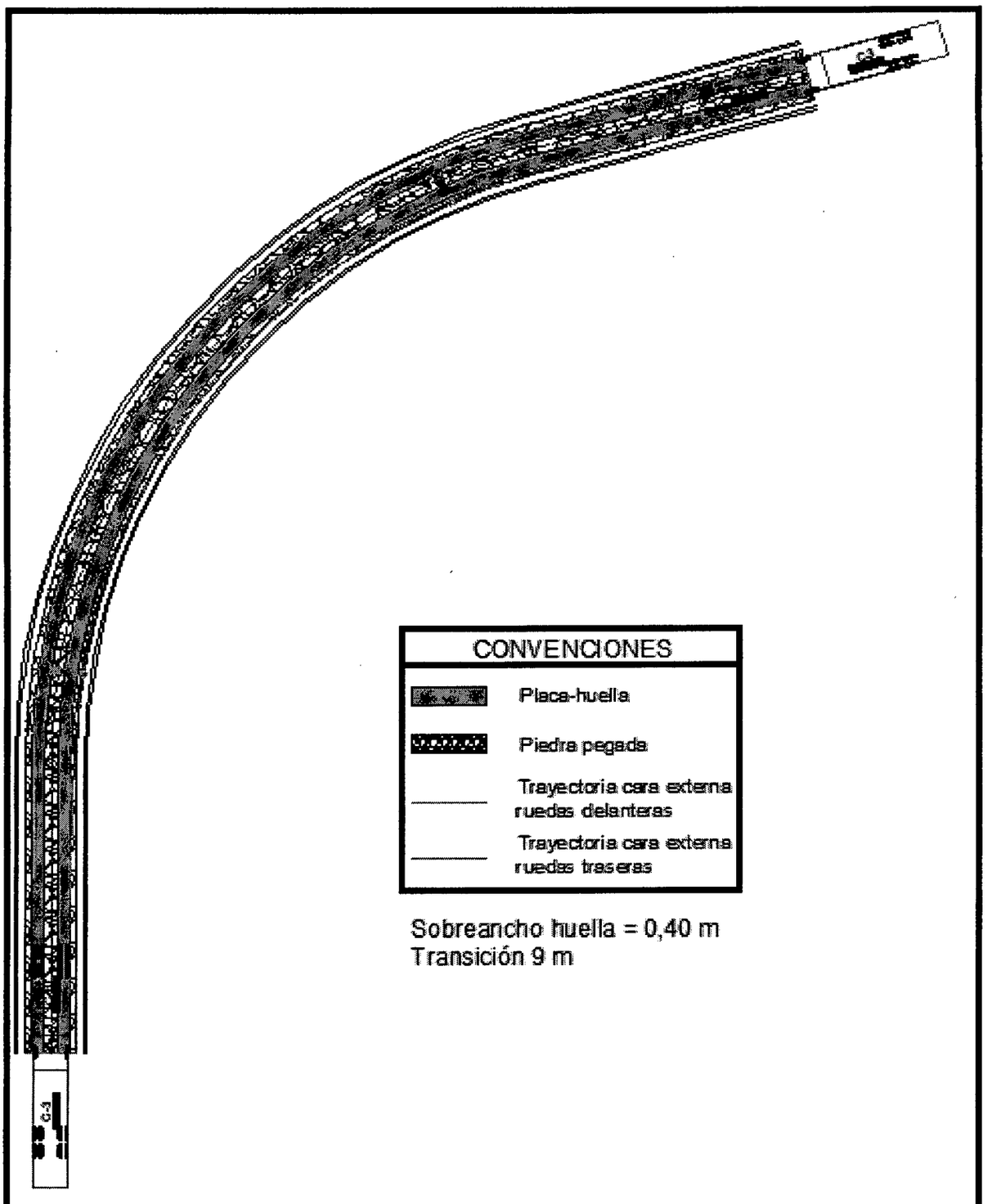
Radio 45 m - Deflexión 45°

0004401 17OCT2017



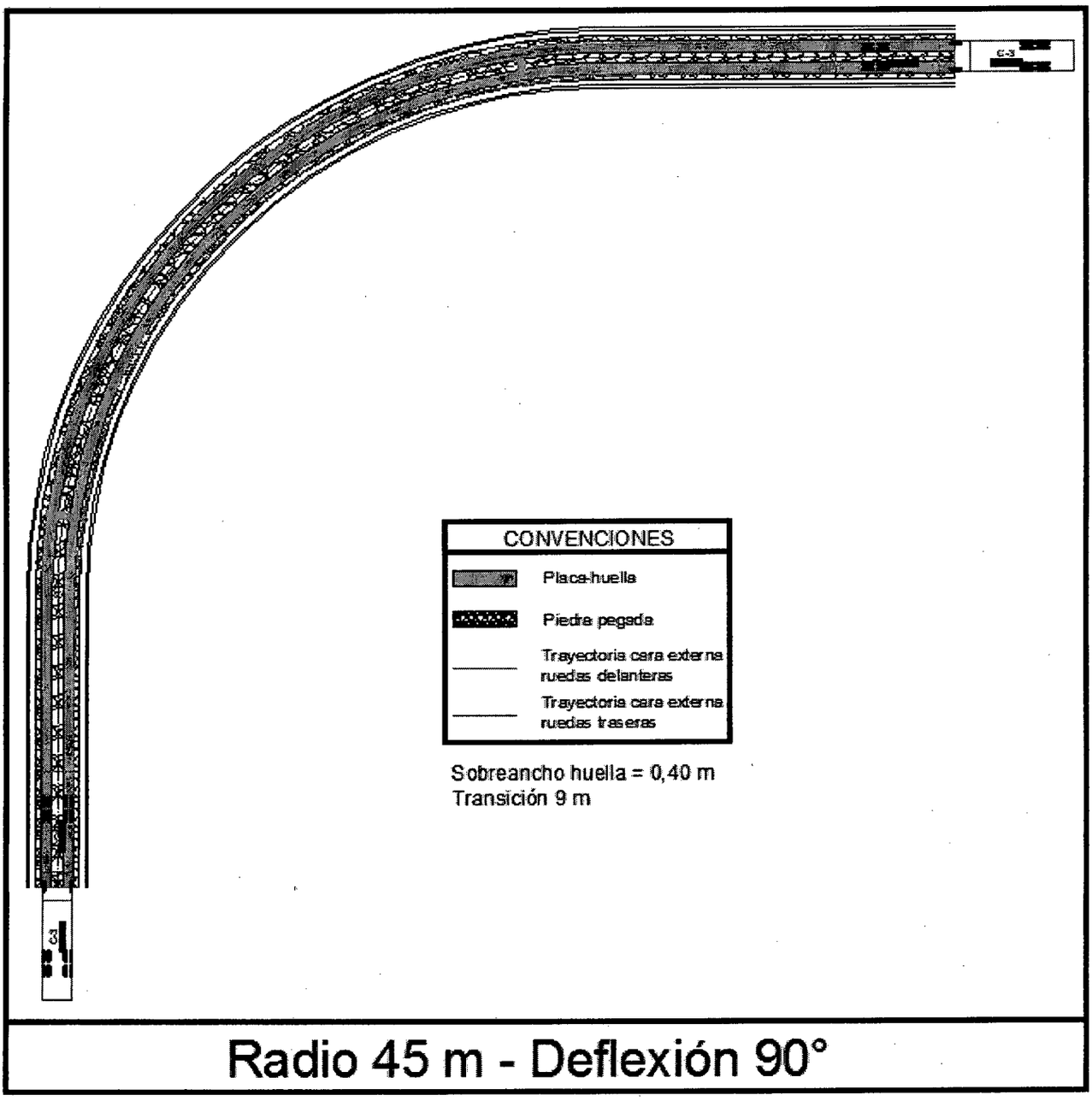
Radio 45 m - Deflexión 60°

0004401 17OCT2017



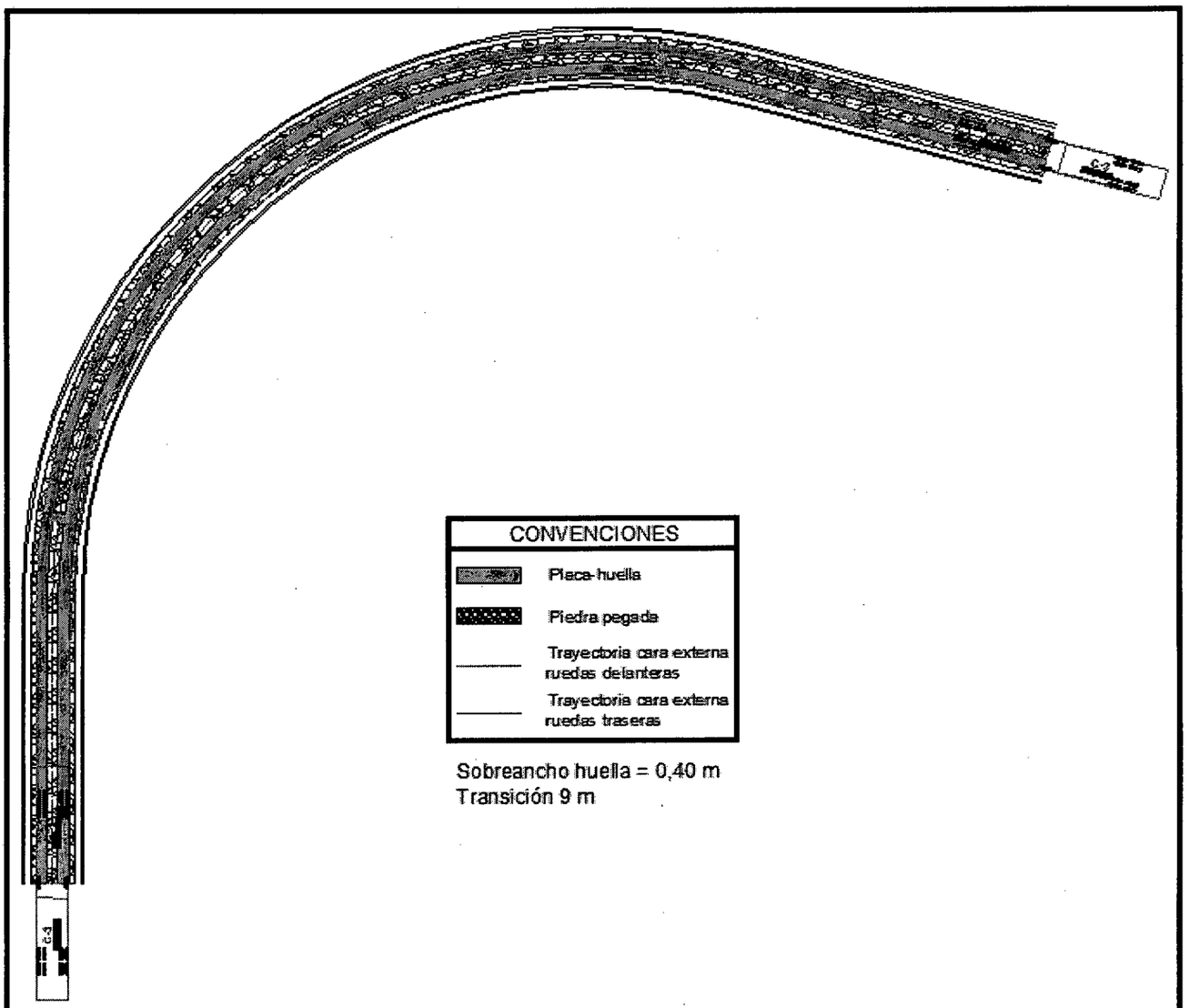
Radio 45 m - Deflexión 75°

0004401 17OCT2017



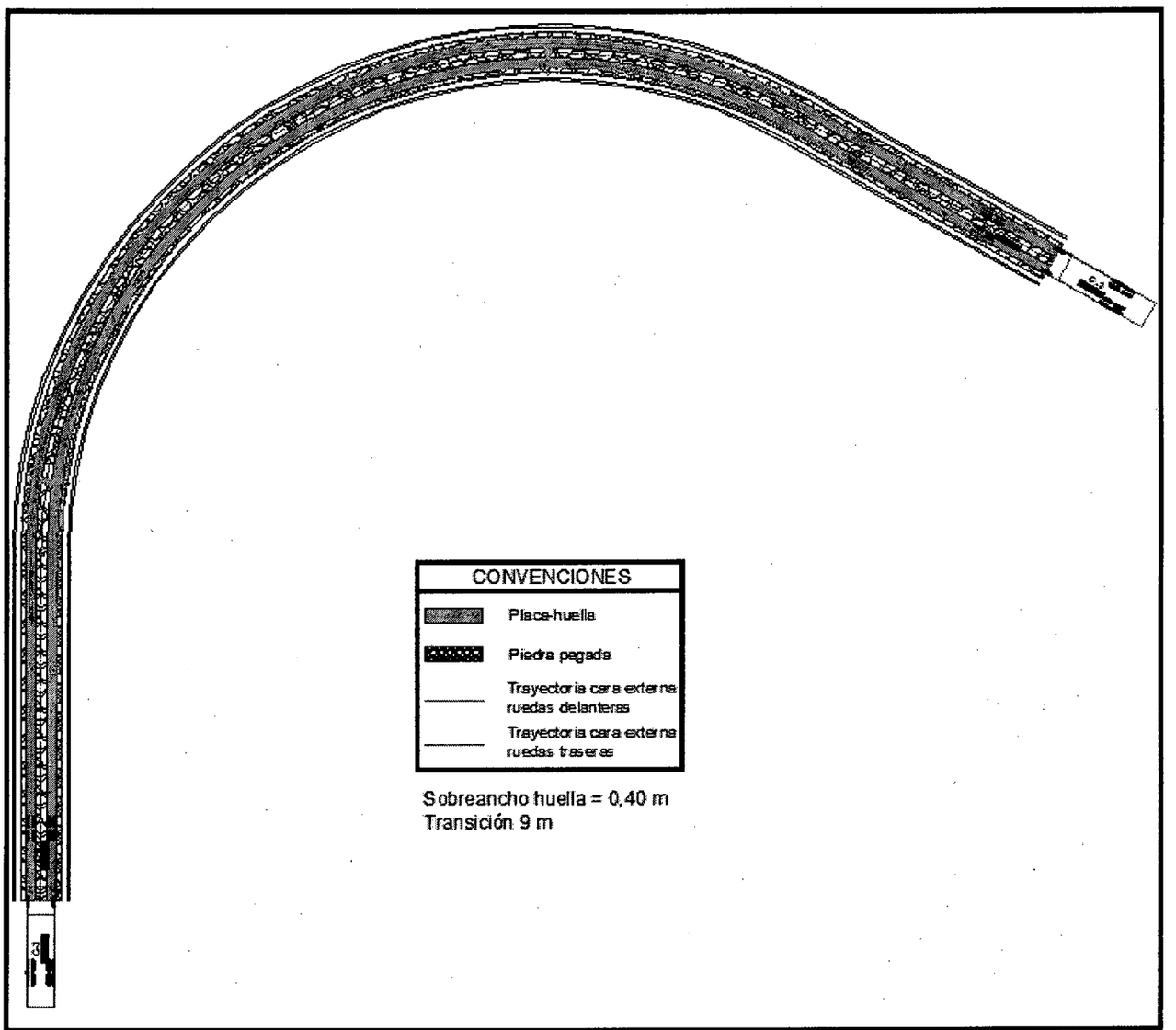
Radio 45 m - Deflexión 90°

0004401 17OCT2017

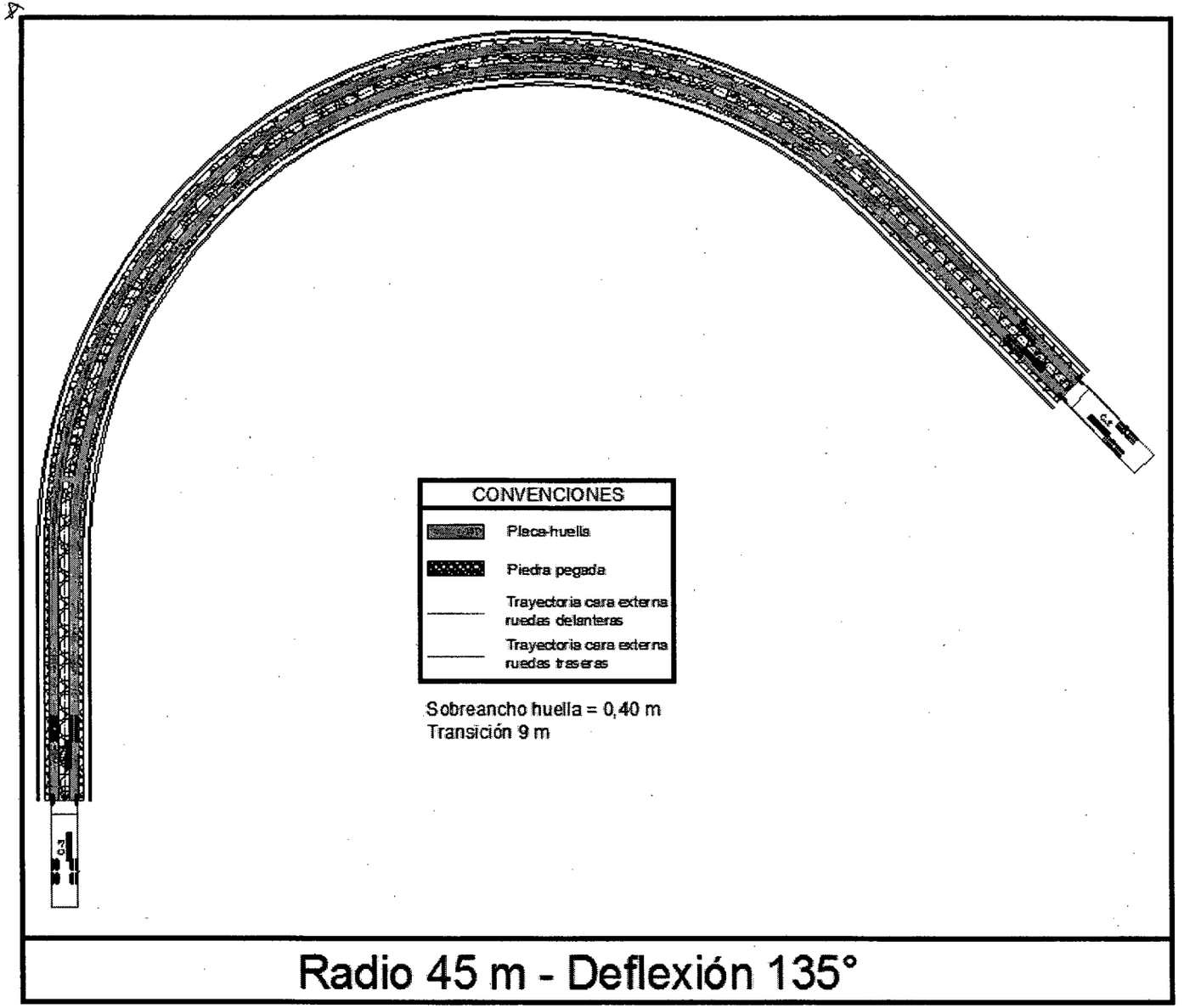


Radio 45 m - Deflexión 105°

0004401 17OCT2017

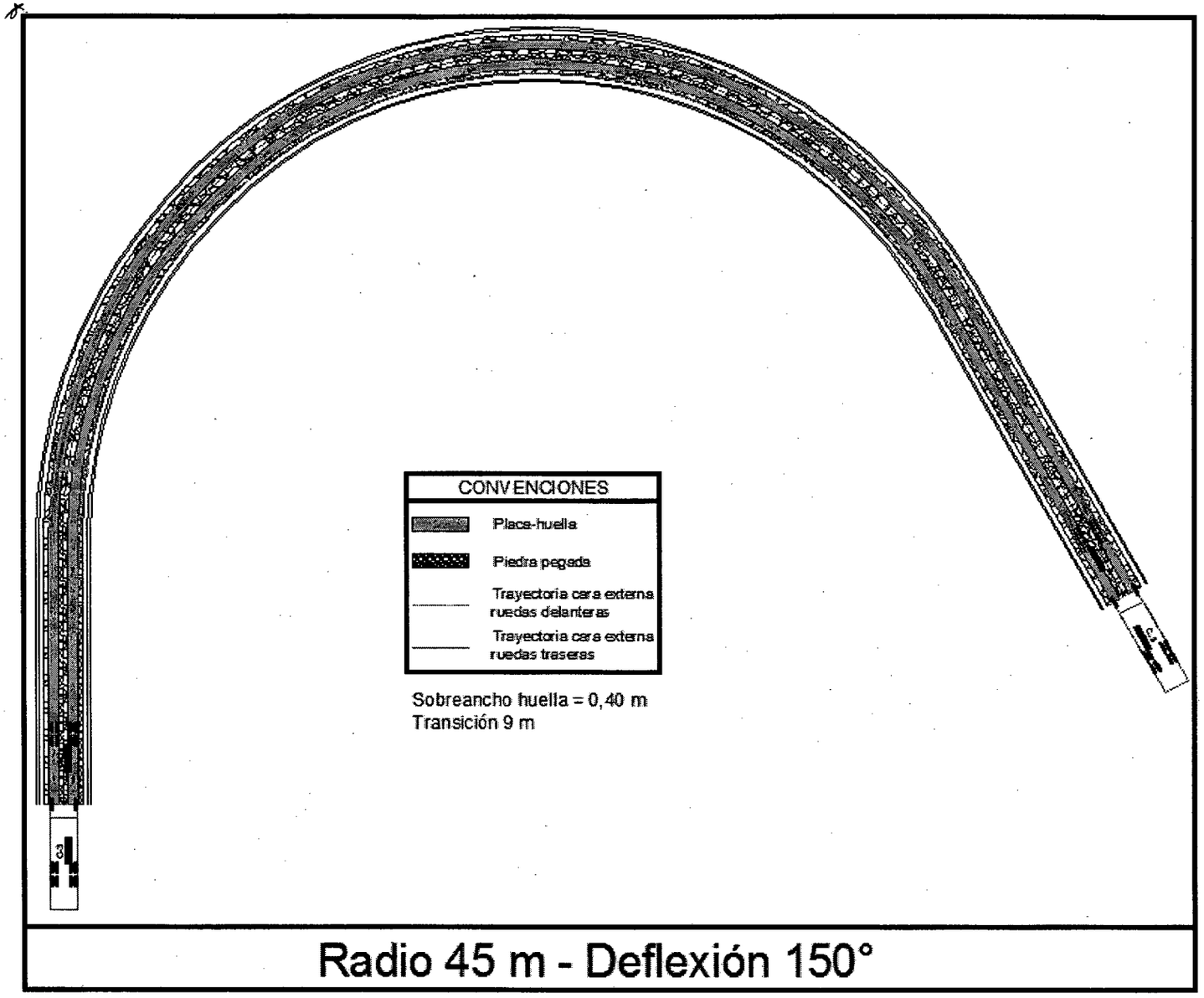


Radio 45 m - Deflexión 120°



Radio 45 m - Deflexión 135°

0004401
17OCT2017

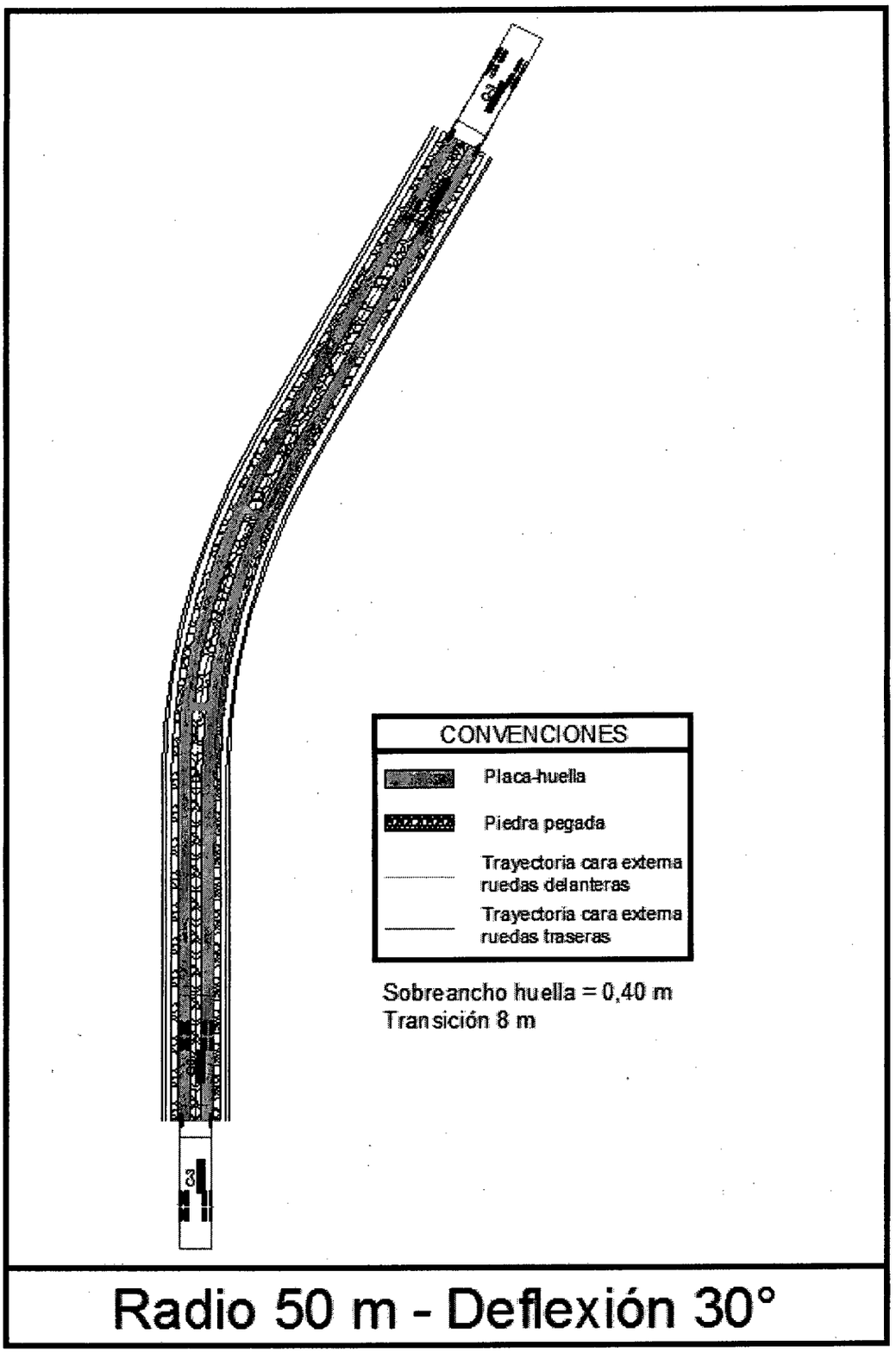


Radio 45 m - Deflexión 150°

000401
17OCT2017

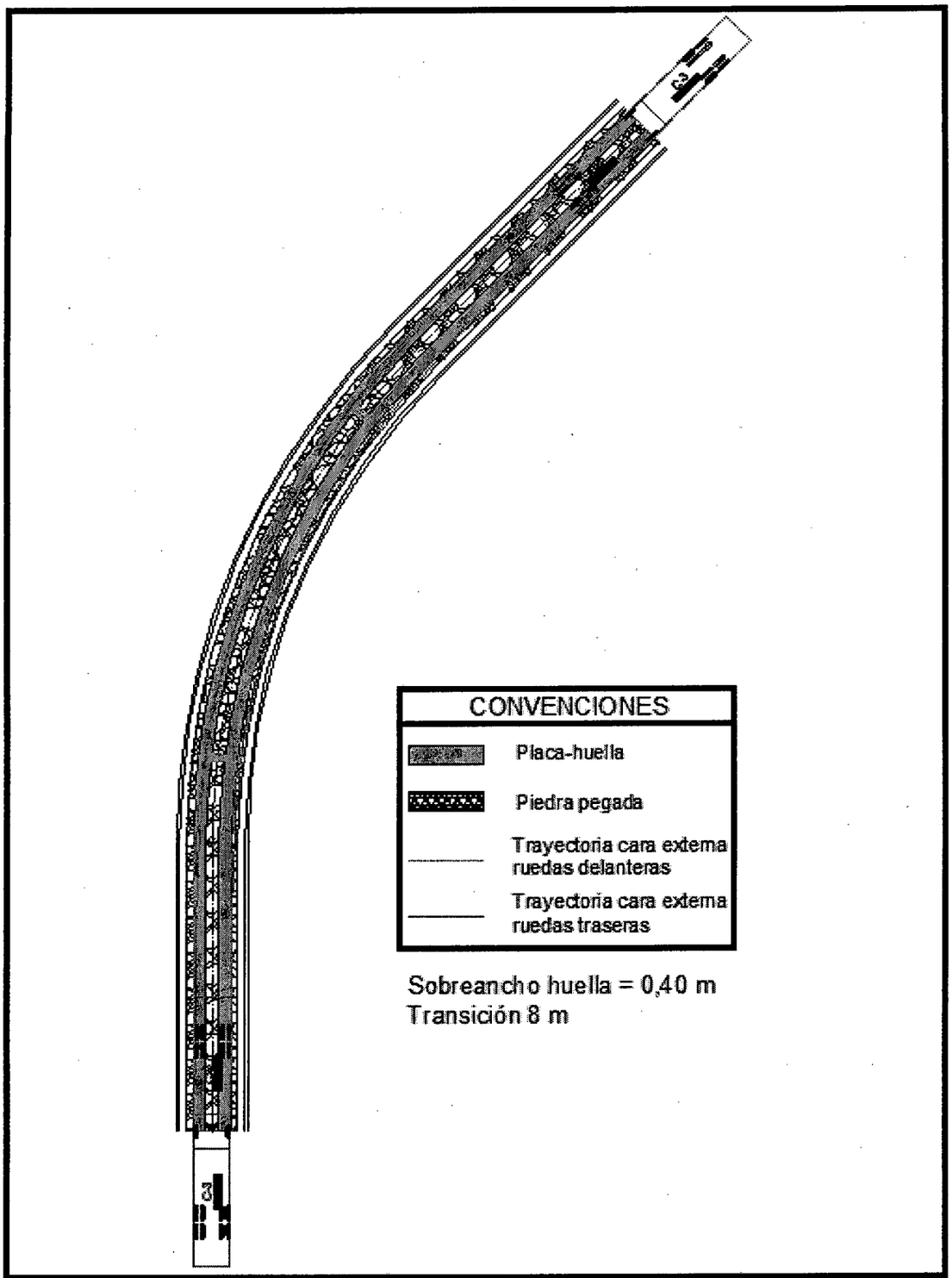
126

0004401 17OCT2017



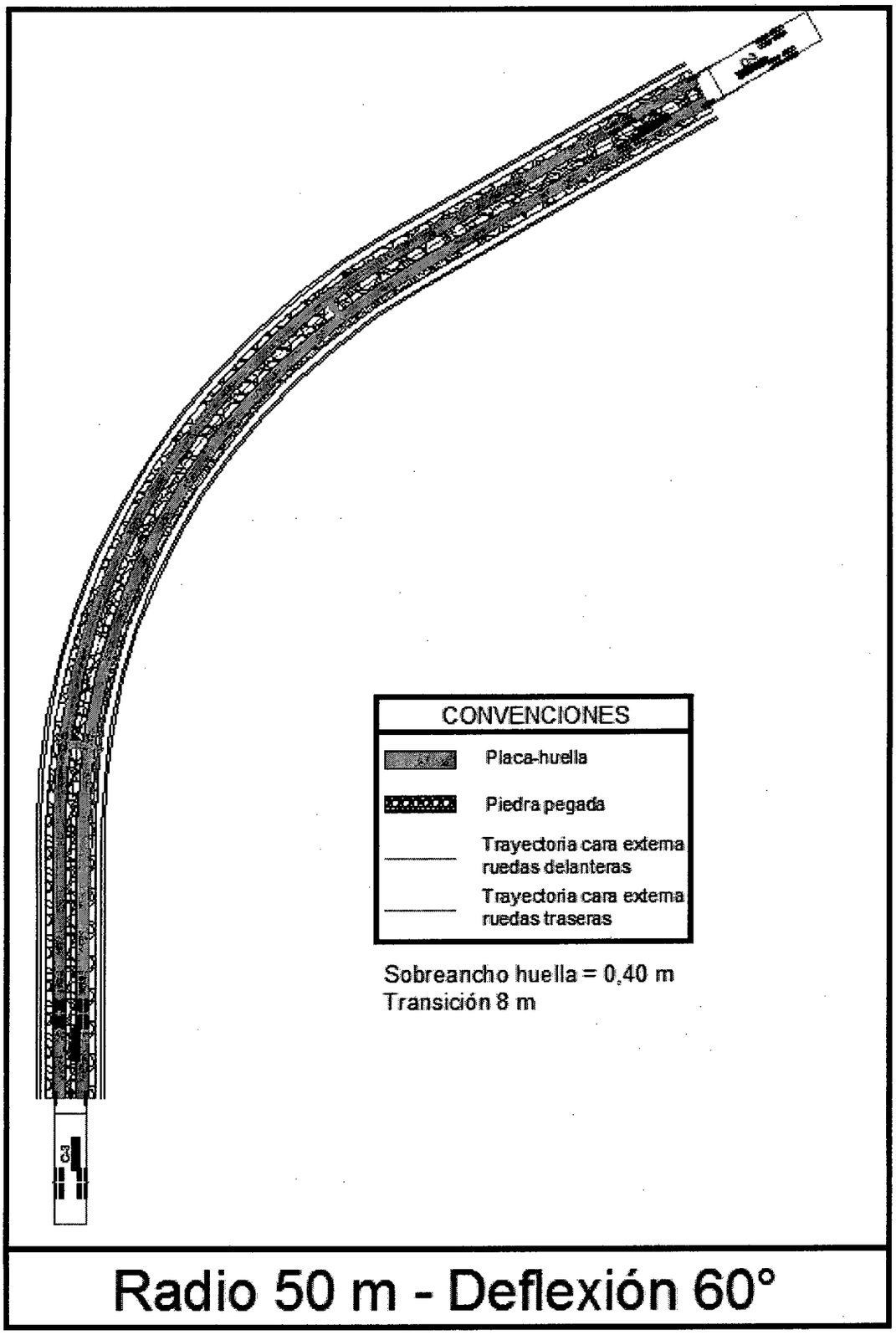
Radio 50 m - Deflexión 30°

0004401 17OCT2017



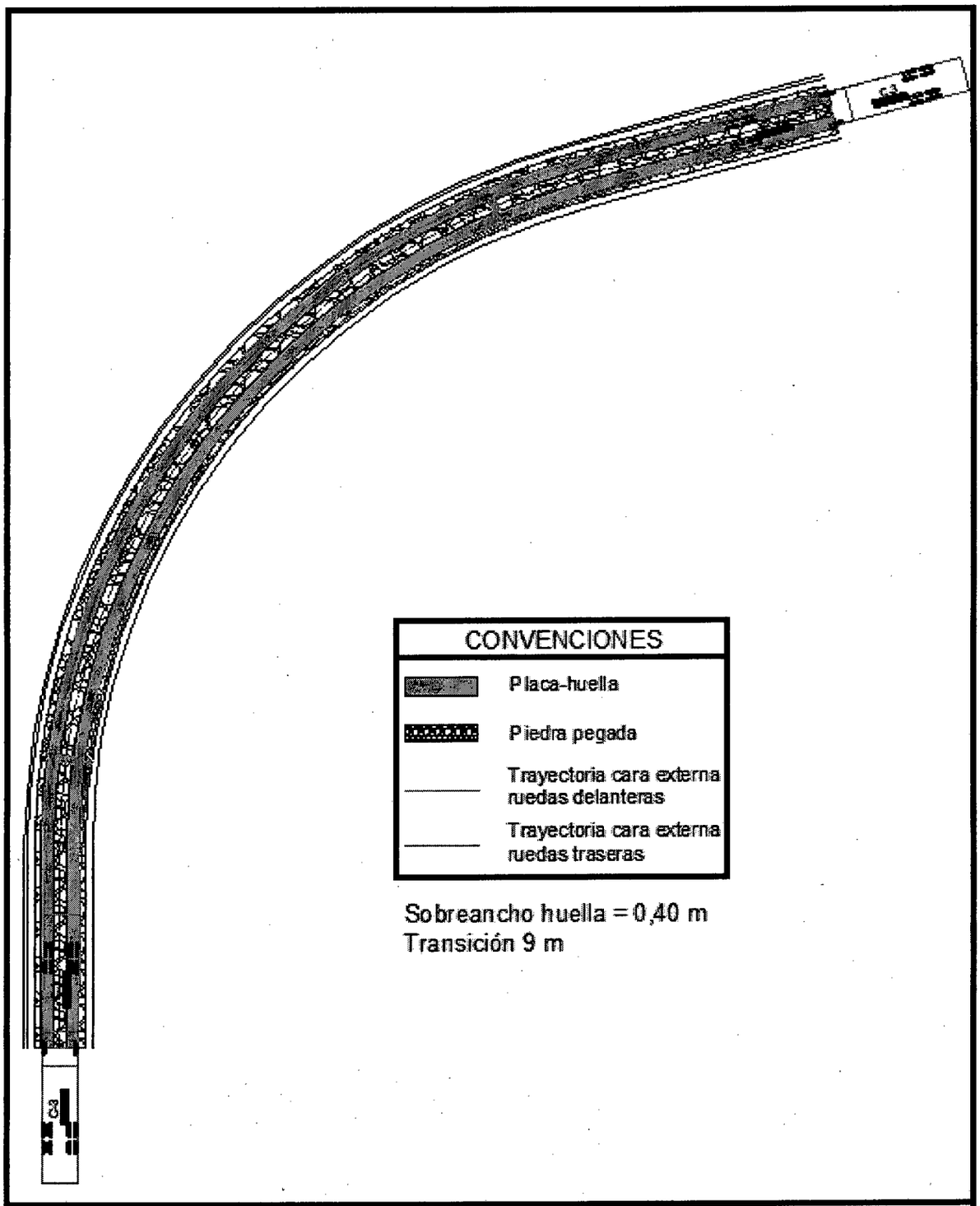
Radio 50 m - Deflexión 45°

0004401 17OCT2017



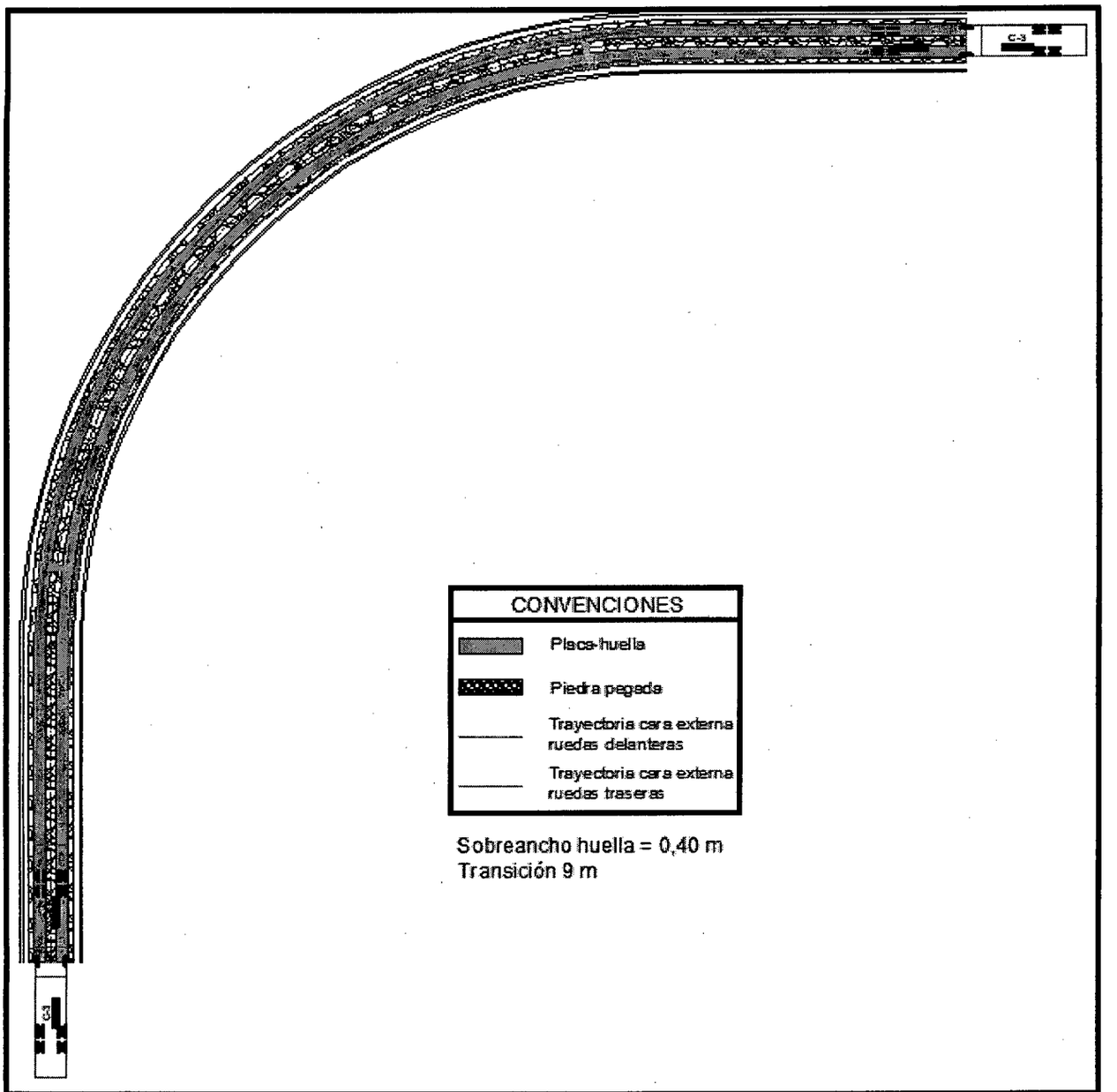
Radio 50 m - Deflexión 60°

0004401 17OCT2017



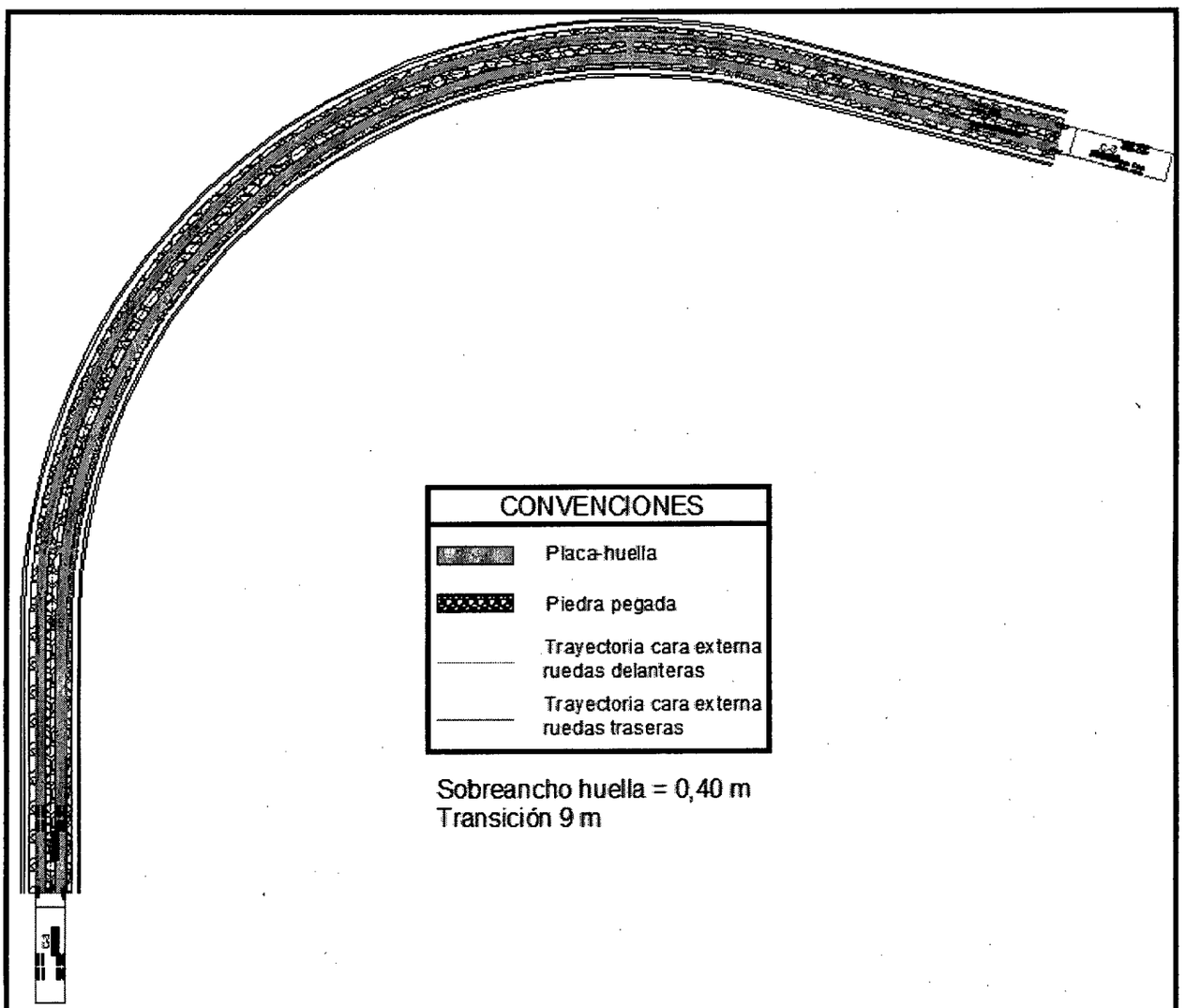
Radio 50 m - Deflexión 75°

0004401 17OCT2017



Radio 50 m - Deflexión 90°

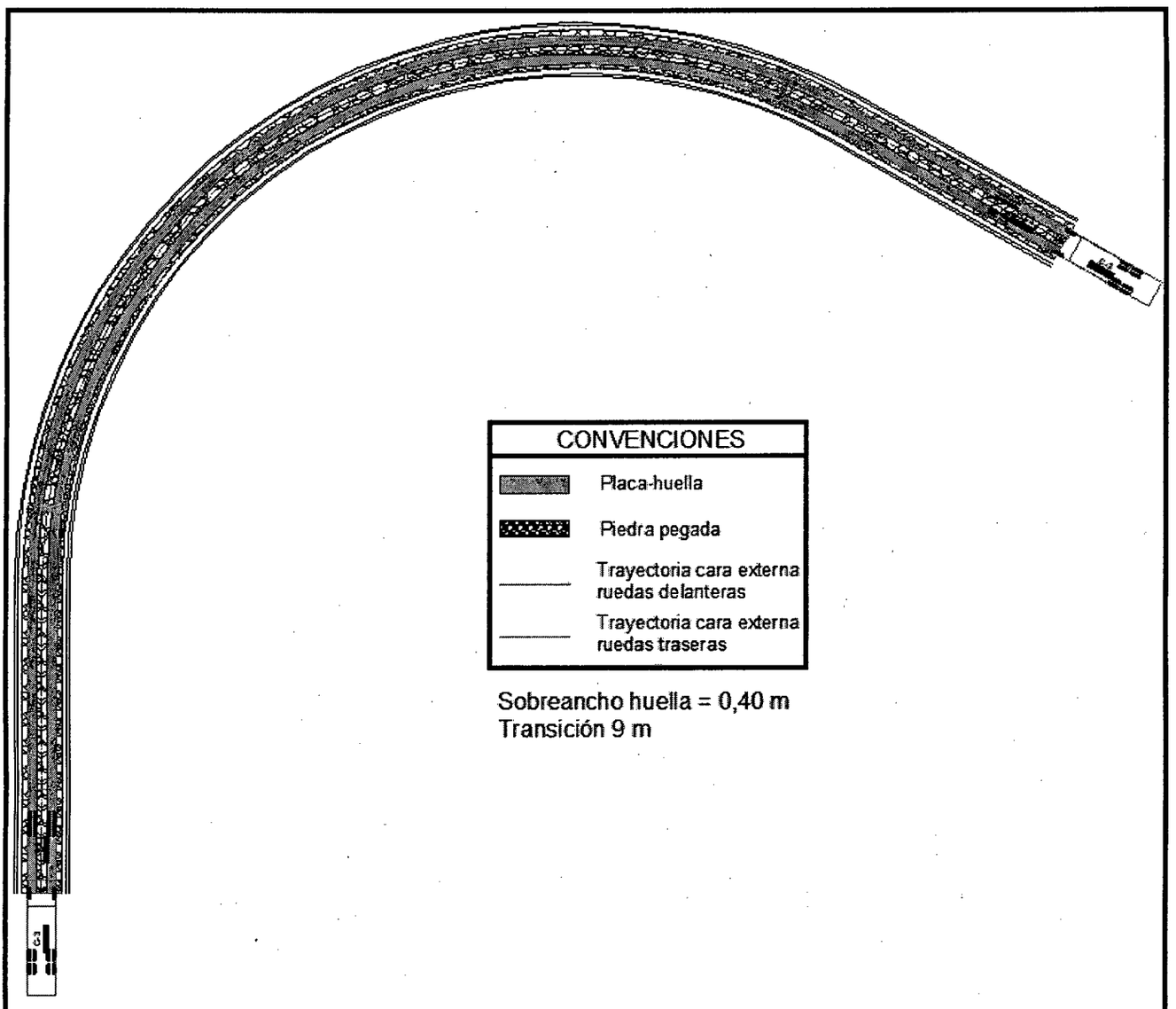
0004401 17 OCT 2017



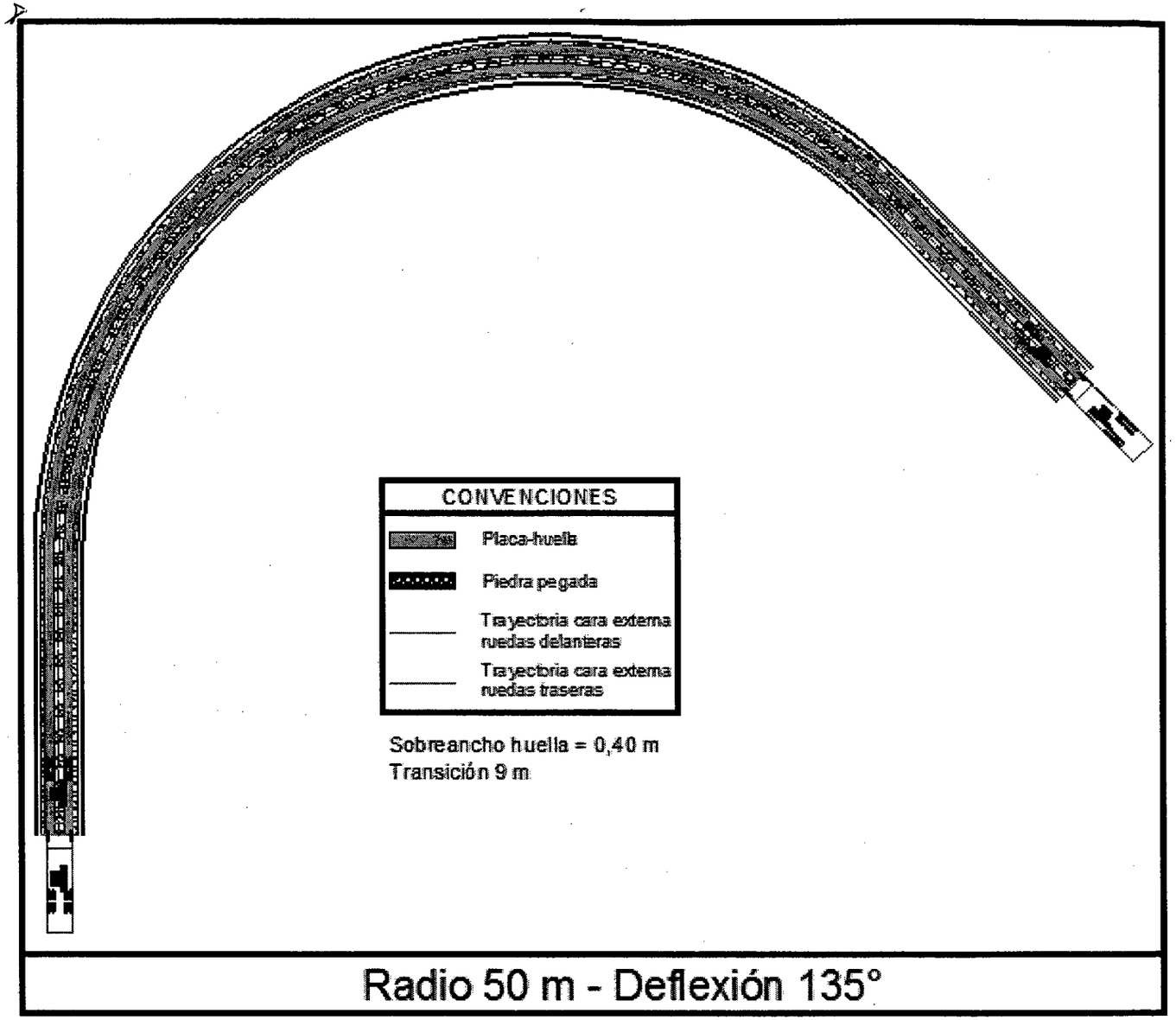
Radio 50 m - Deflexión 105°

183

0004401 17OCT2017

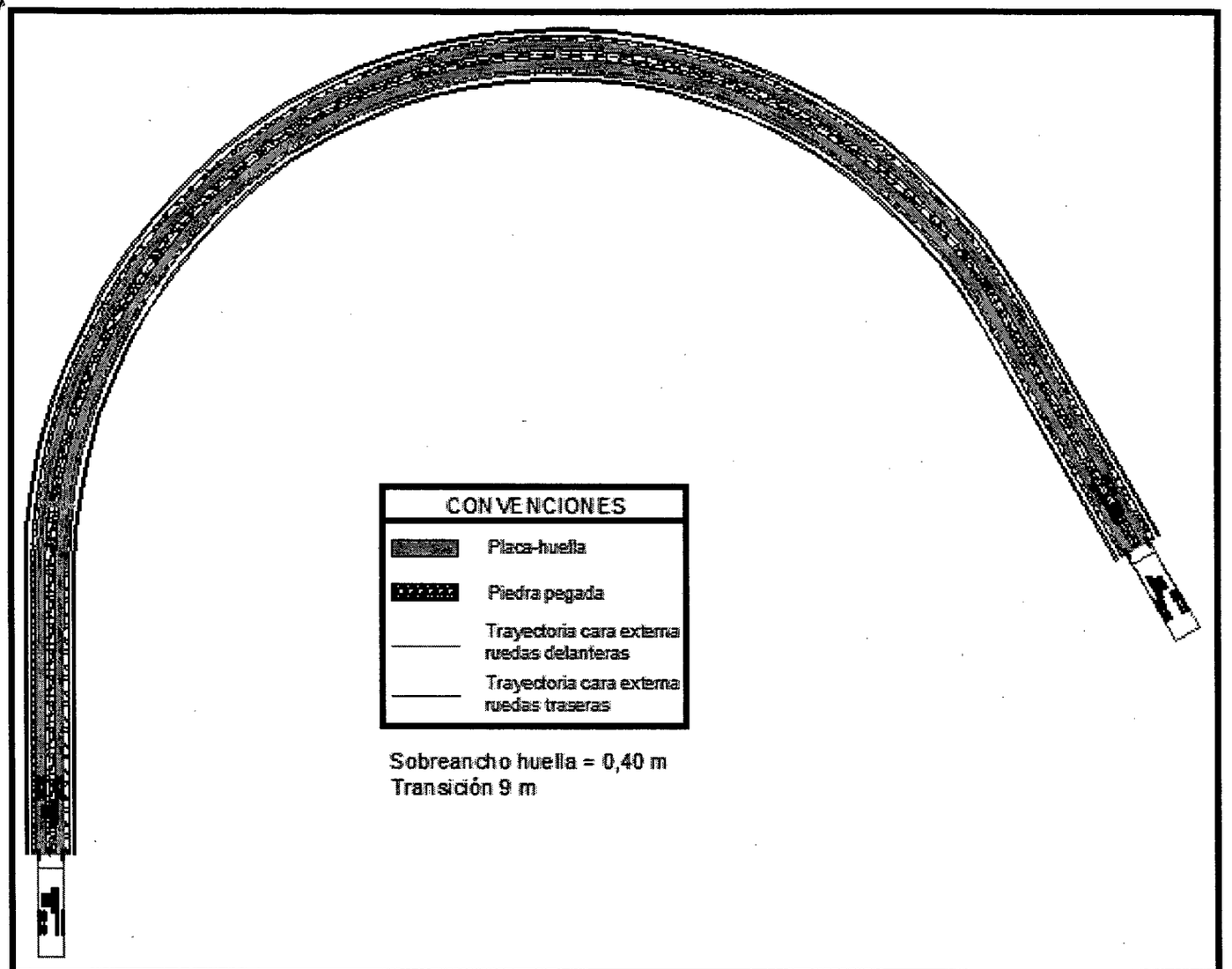


Radio 50 m - Deflexión 120°



Radio 50 m - Deflexión 135°

0004401
17OCT2017

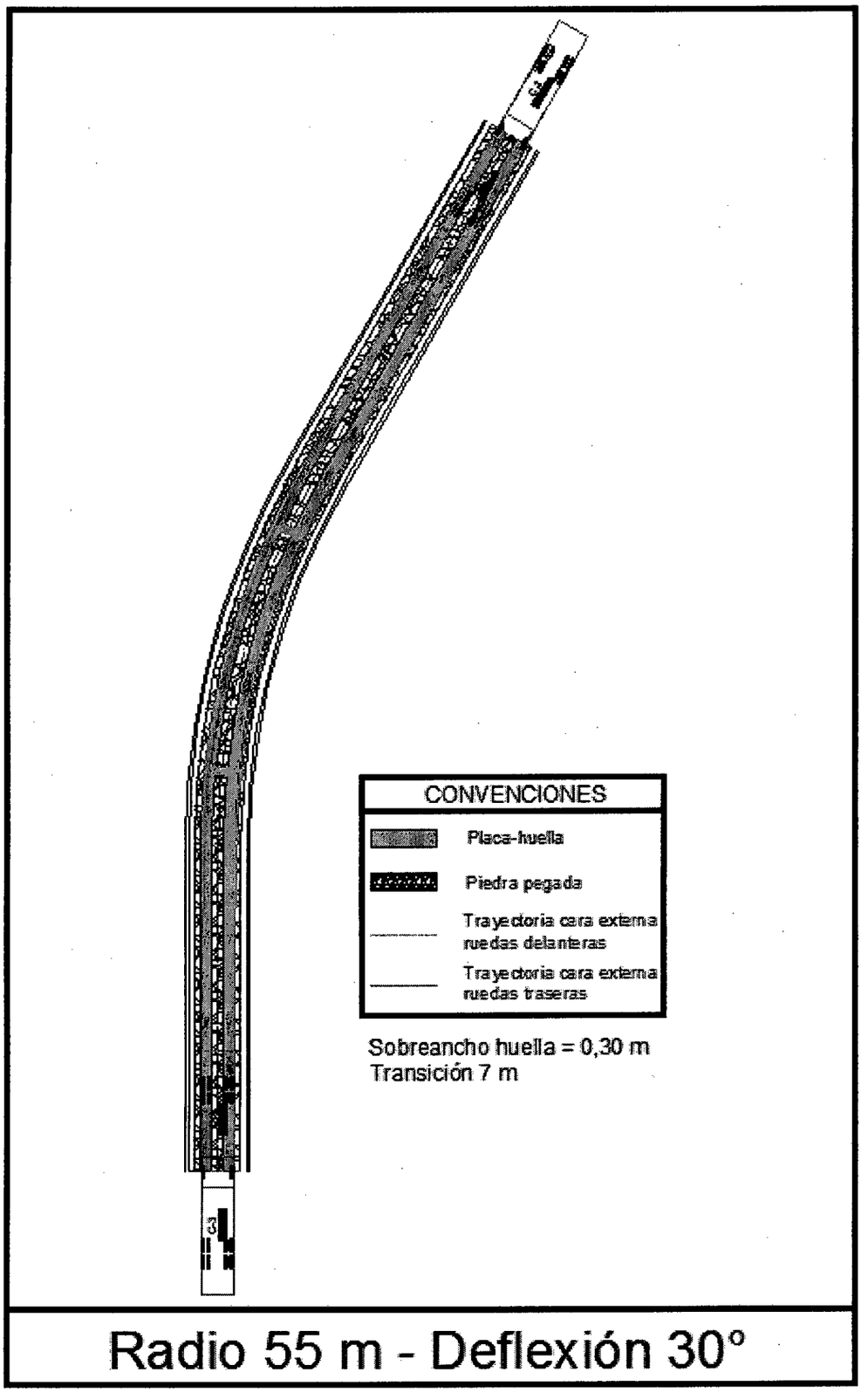


Radio 50 m - Deflexión 150°

0004401
17OCT2017

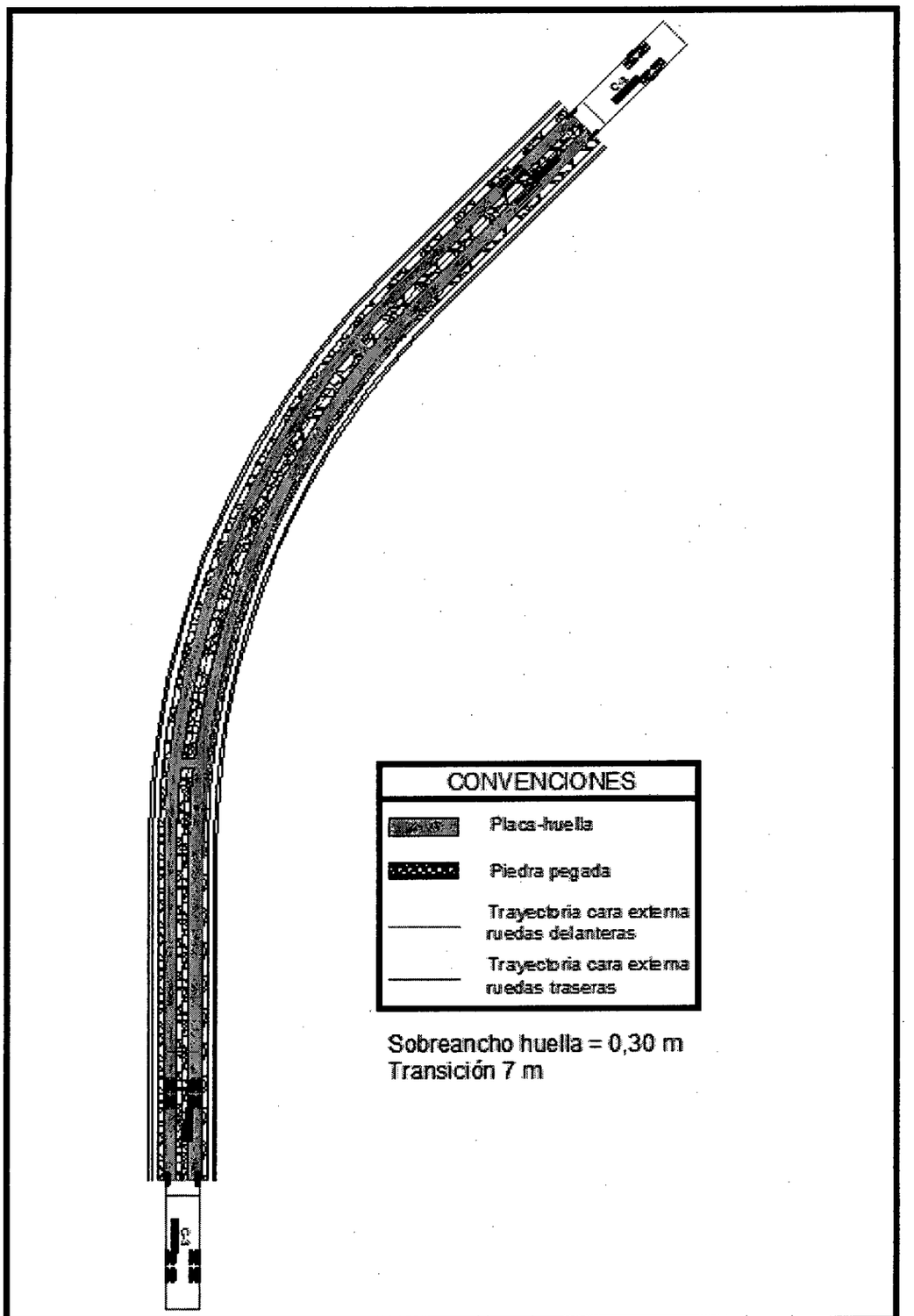
587

0004401 17OCT 2017



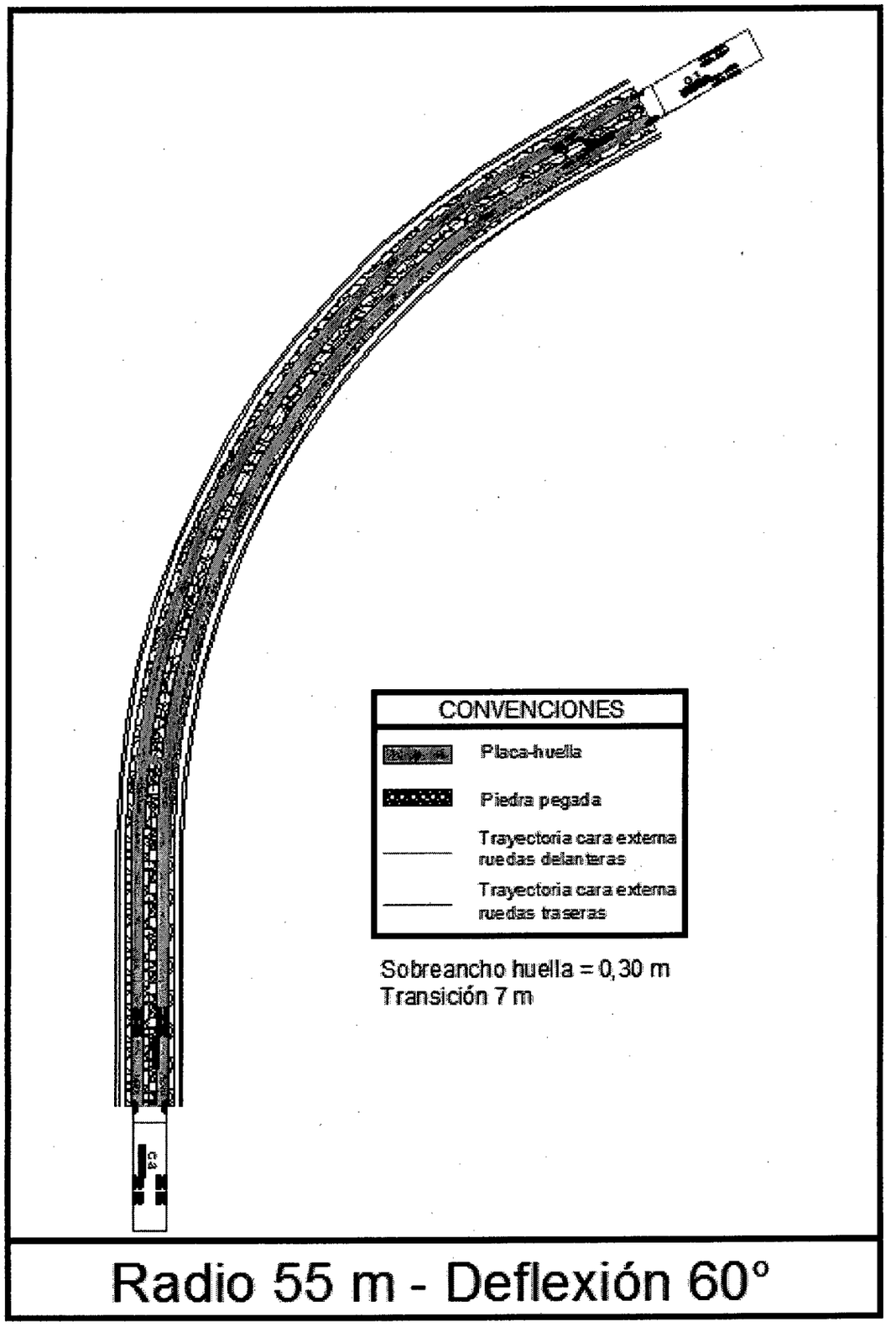
Radio 55 m - Deflexión 30°

0004401 17OCT2017



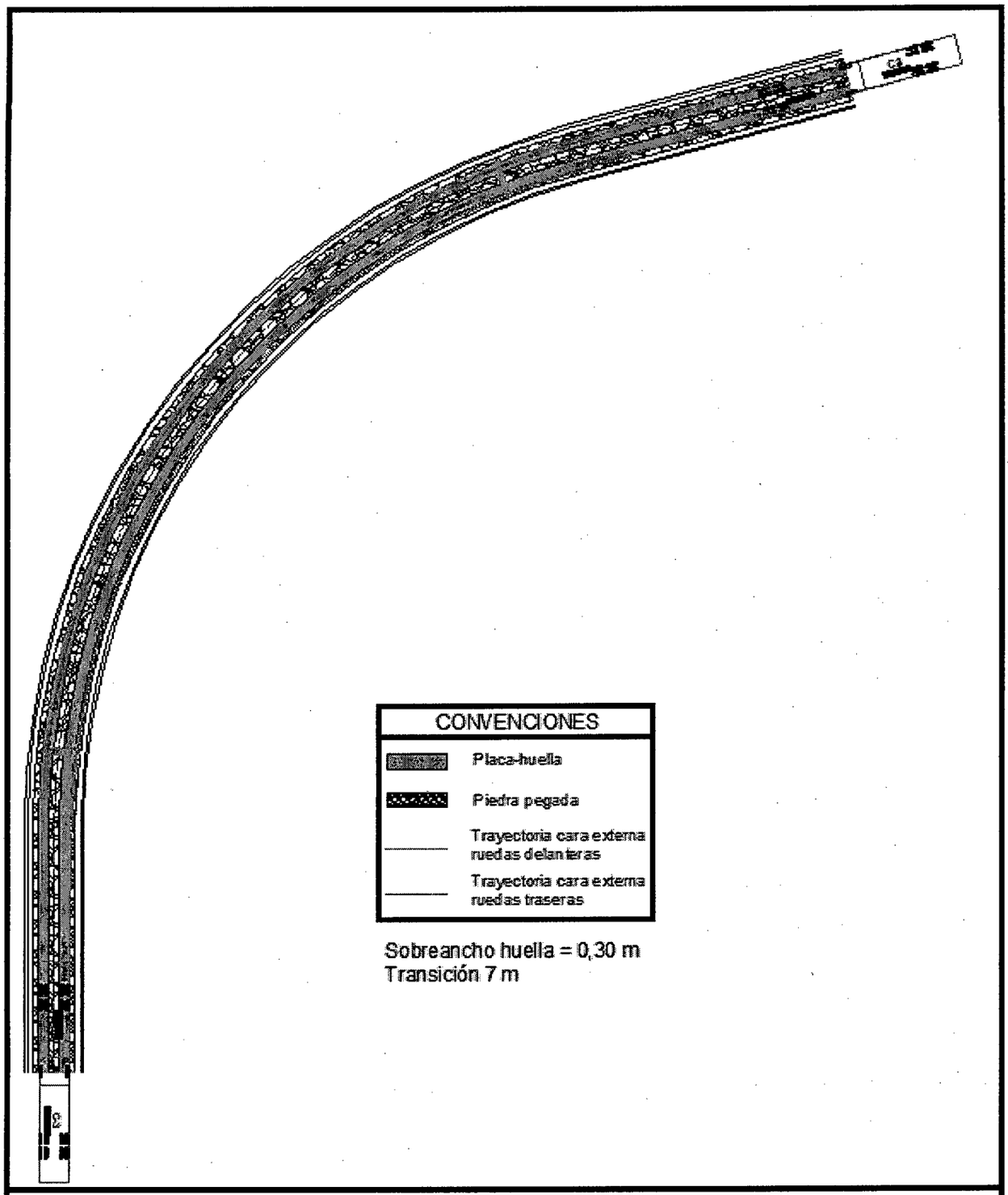
Radio 55 m - Deflexión 45°

0004401 17OCT2017



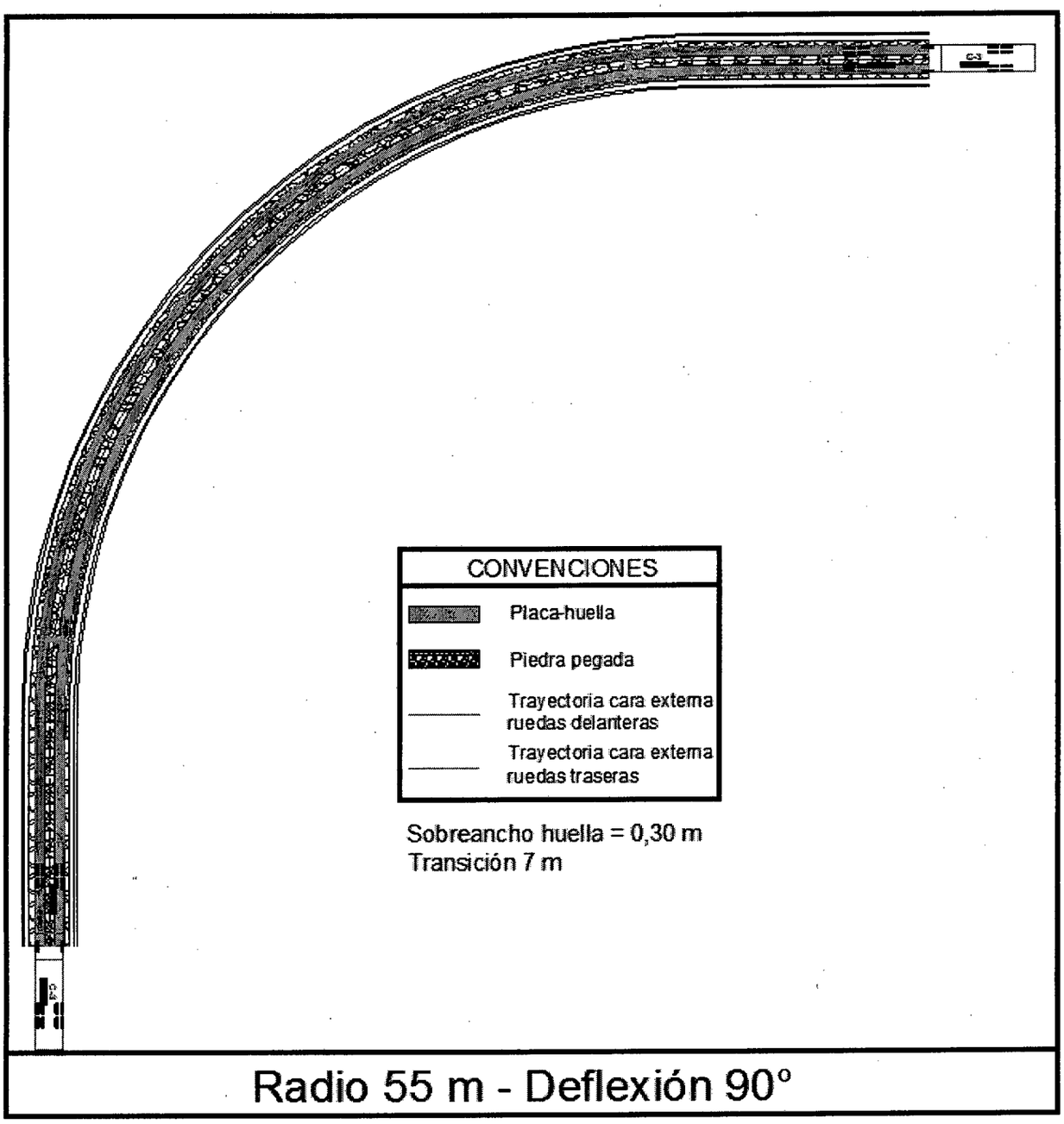
Radio 55 m - Deflexión 60°

0004401 17 OCT 2017

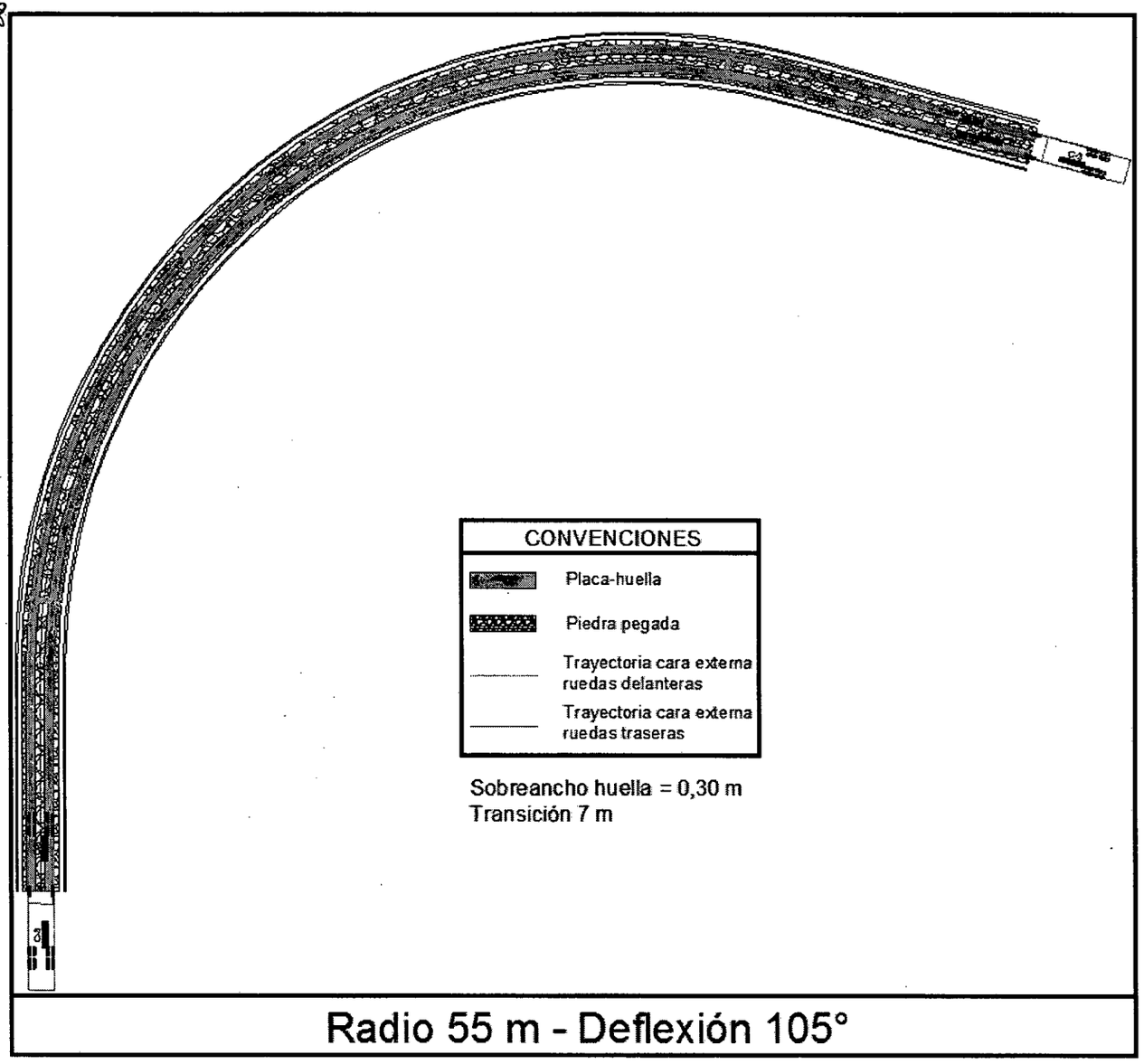


Radio 55 m - Deflexión 75°

0004401 17OCT2017

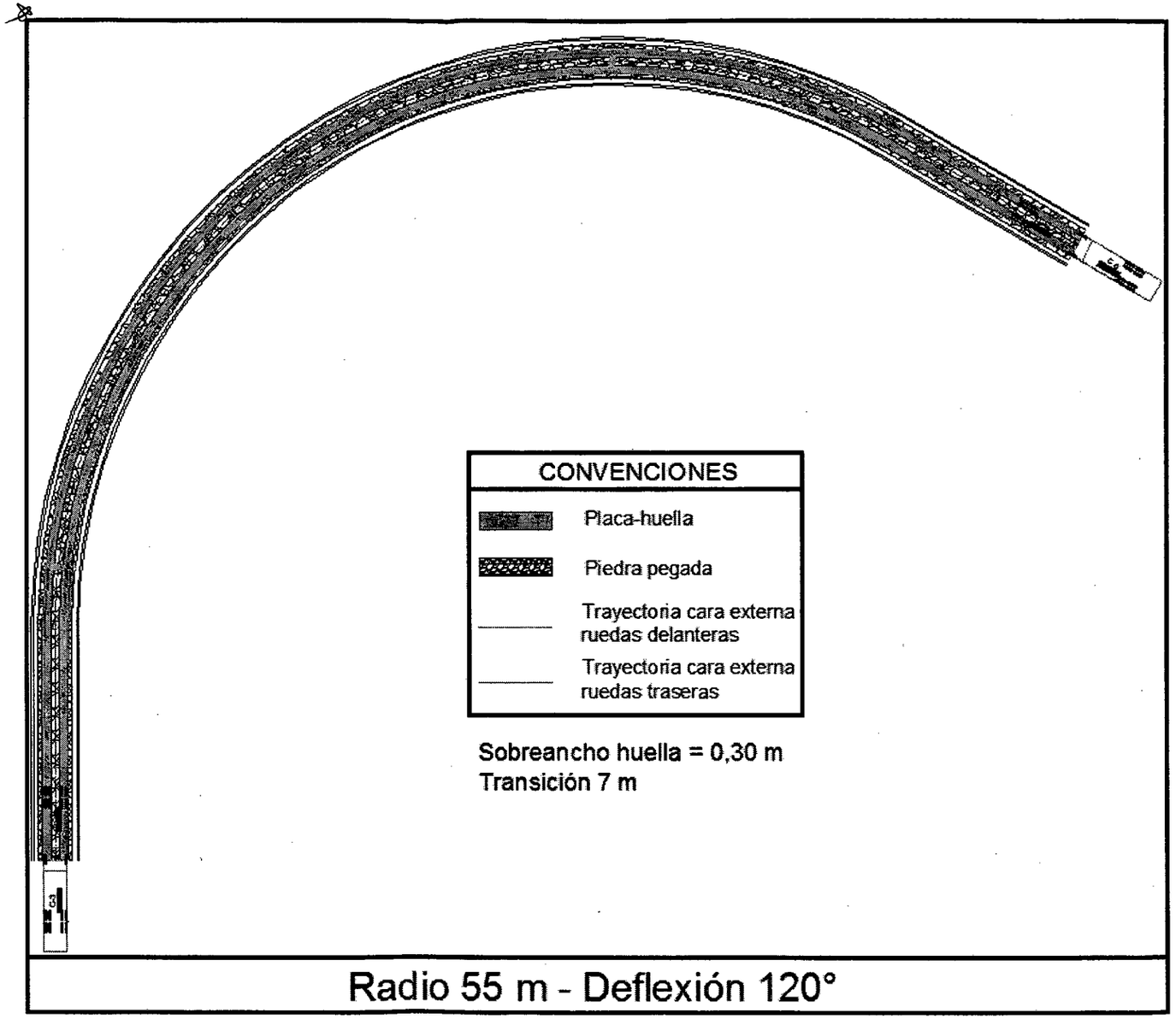


Radio 55 m - Deflexión 90°



Radio 55 m - Deflexión 105°

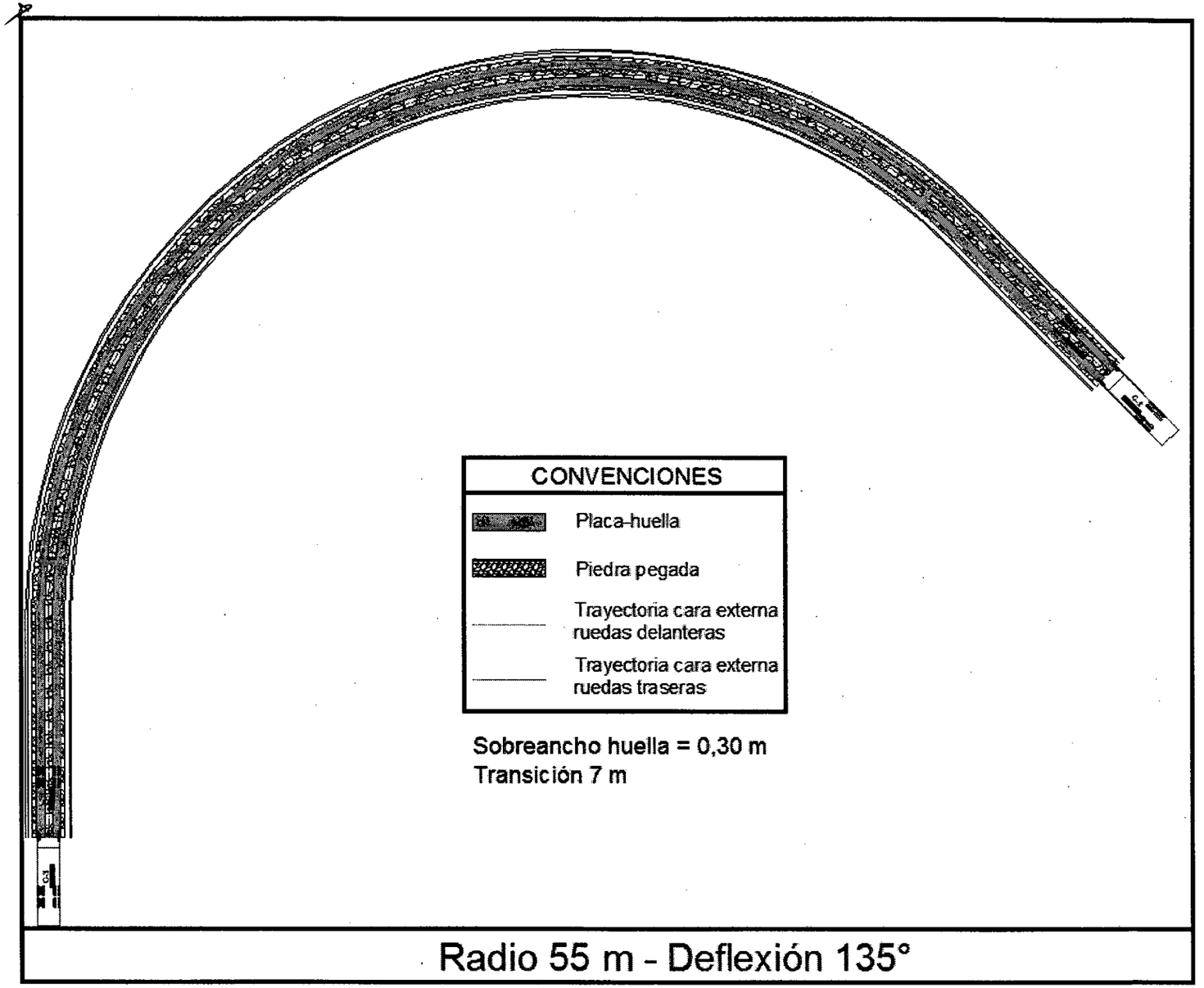
17OCT2017
0004401



Radio 55 m - Deflexión 120°

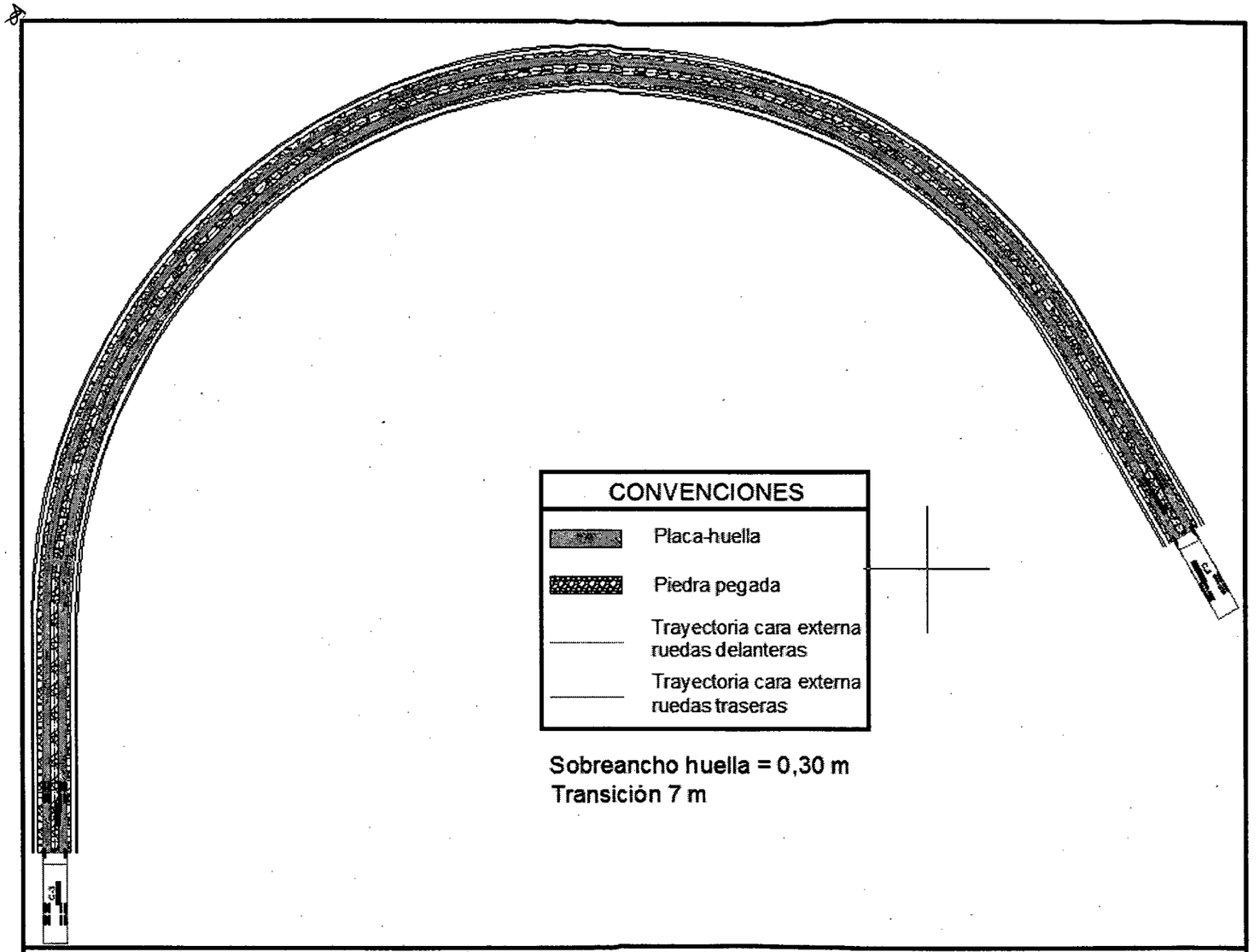
0004401
17 OCT 2017

26



17 OCT 2017
0004401

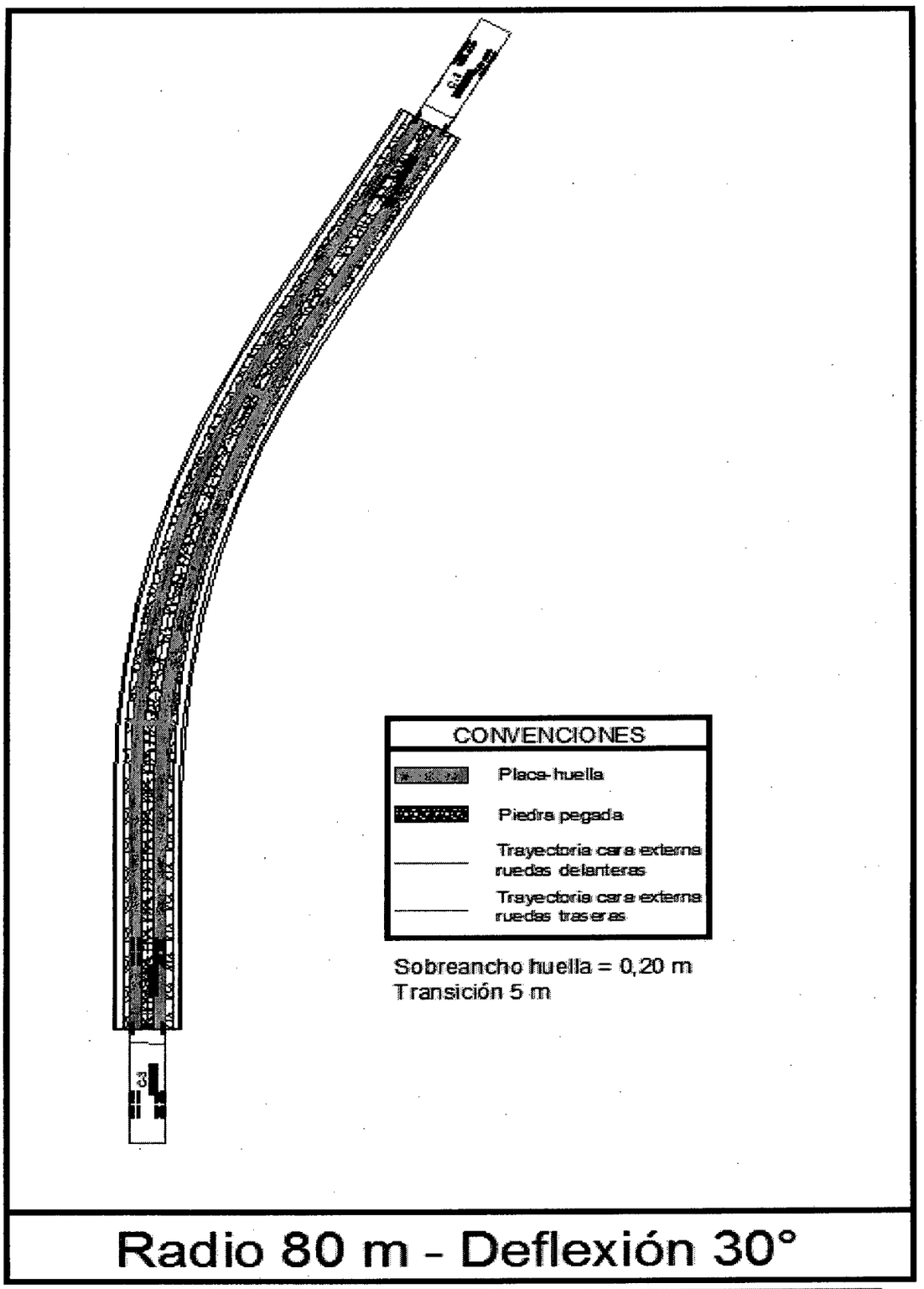
123



Radio 55 m - Deflexión 150°

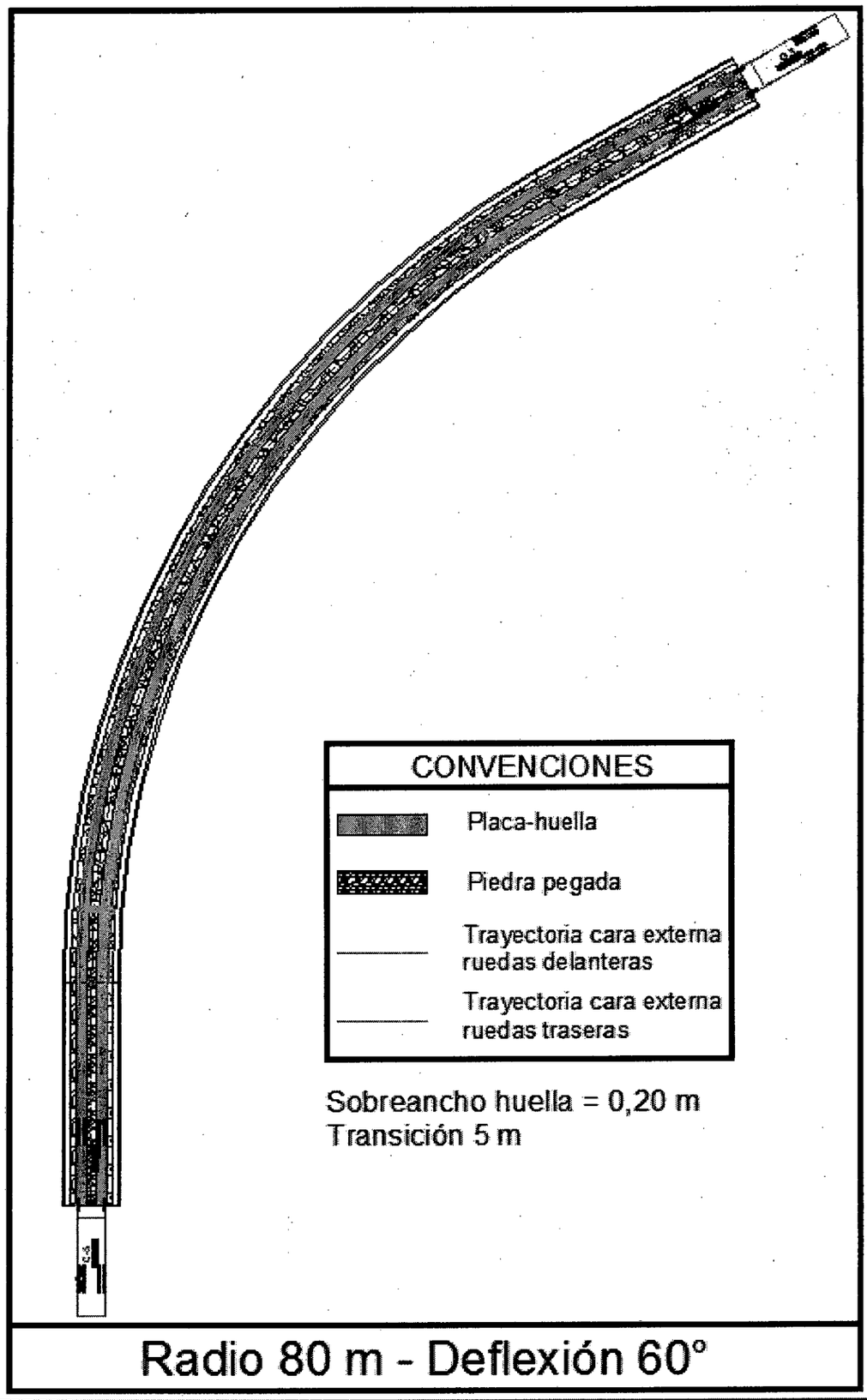
0004401 17OCT2017

0004401 17OCT2017



Radio 80 m - Deflexión 30°

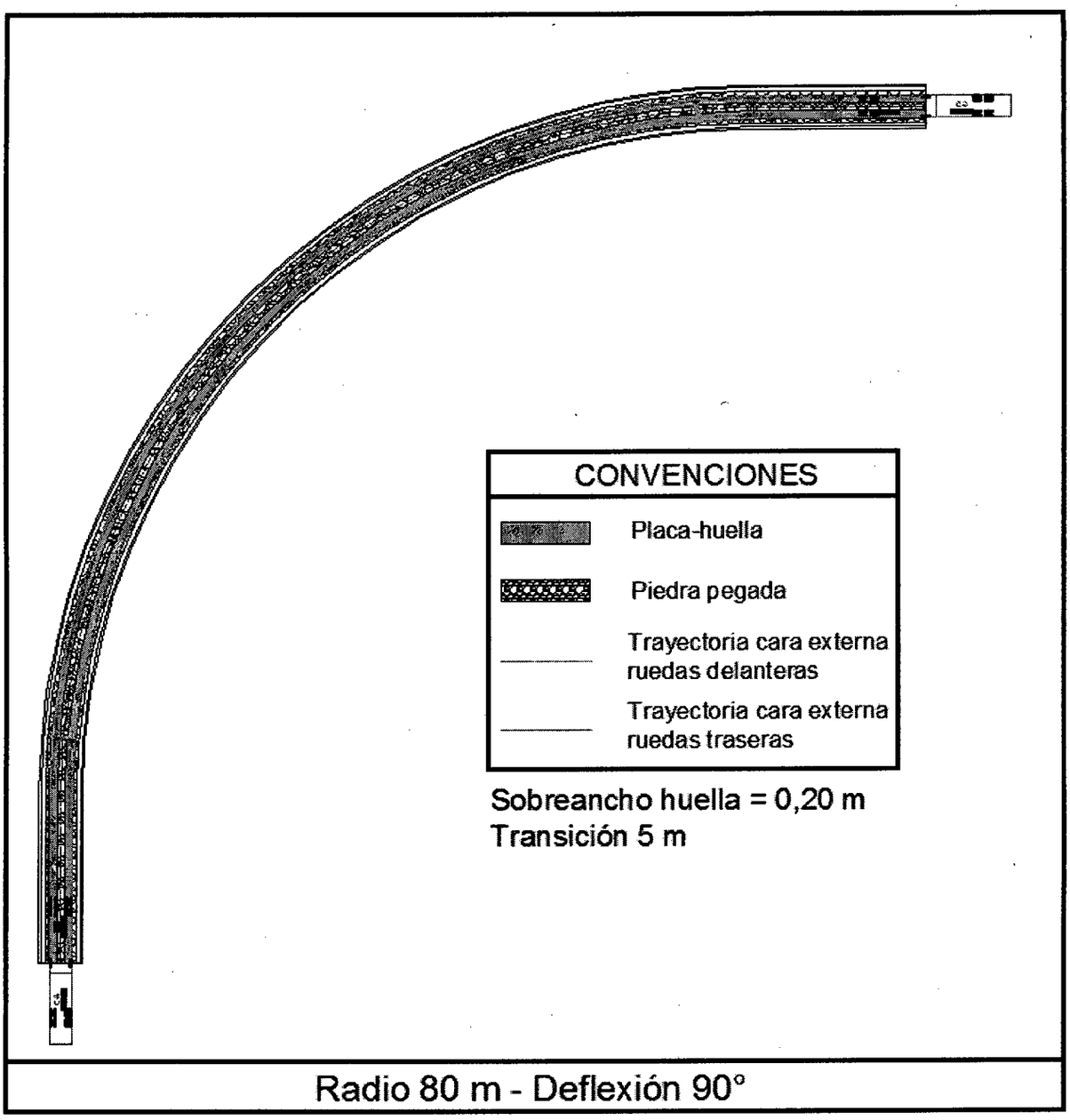
0004401 17OCT2017



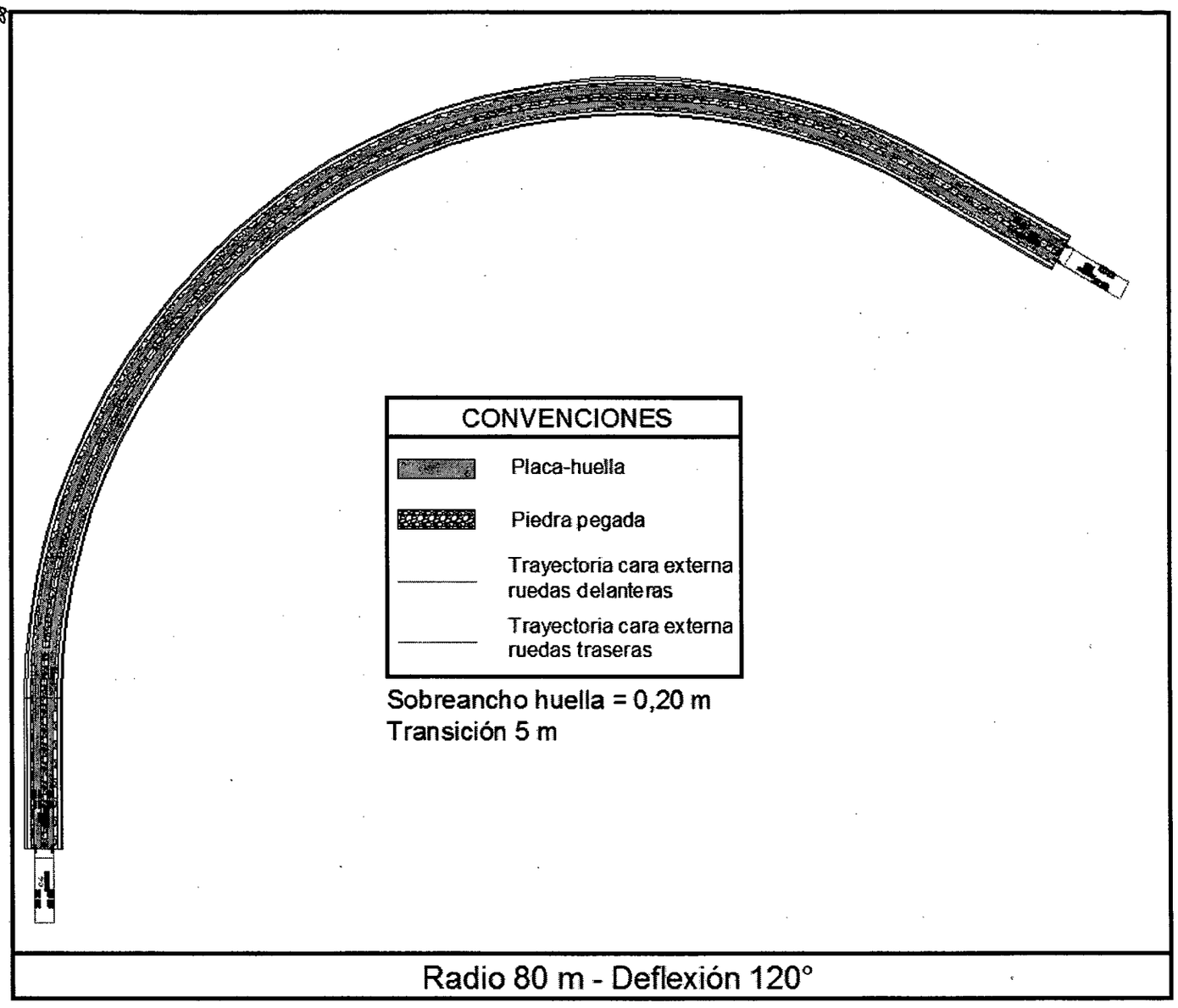
Radio 80 m - Deflexión 60°

197

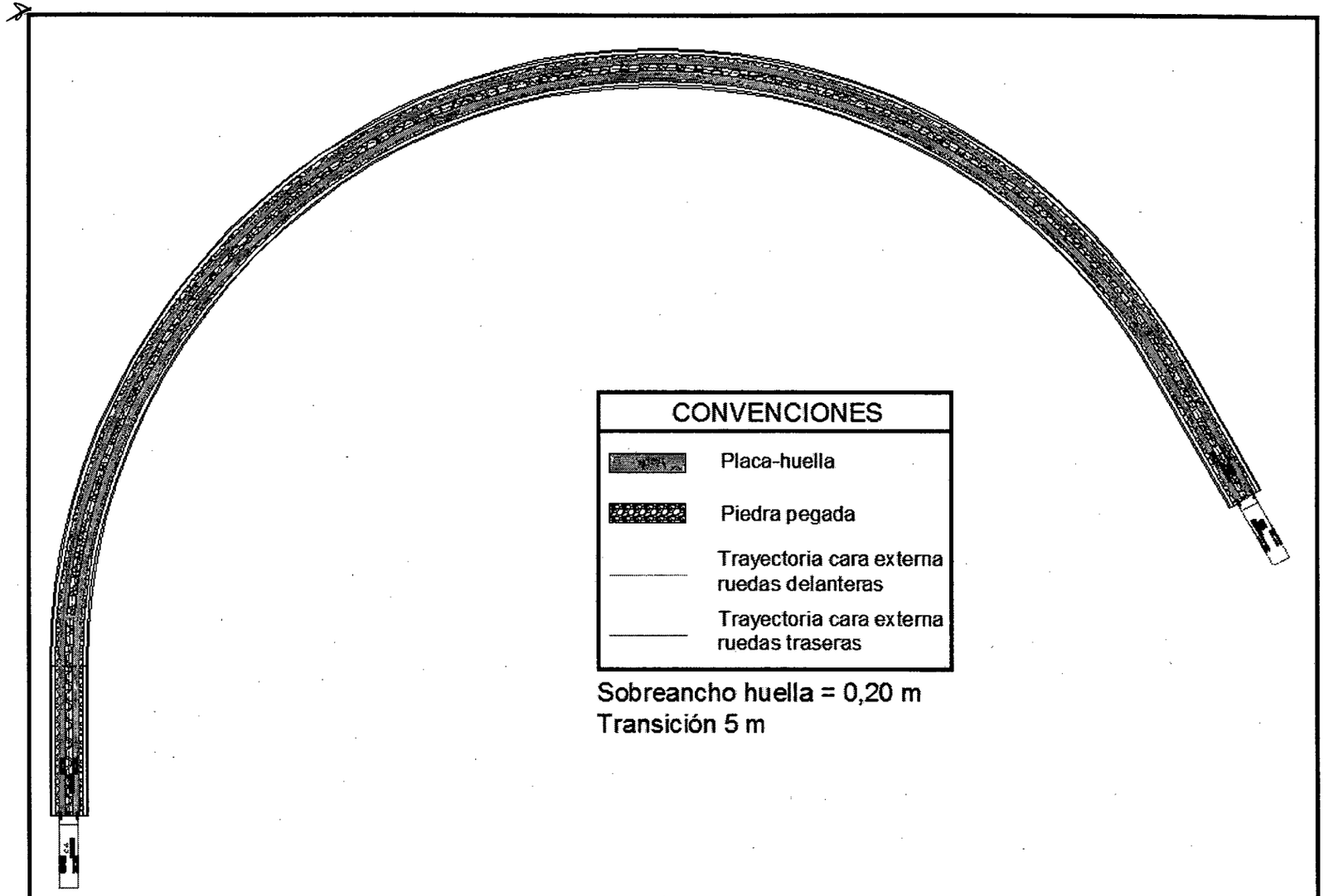
0004401 17OCT2017



Radio 80 m - Deflexión 90°



0004401 17 OCT 2017

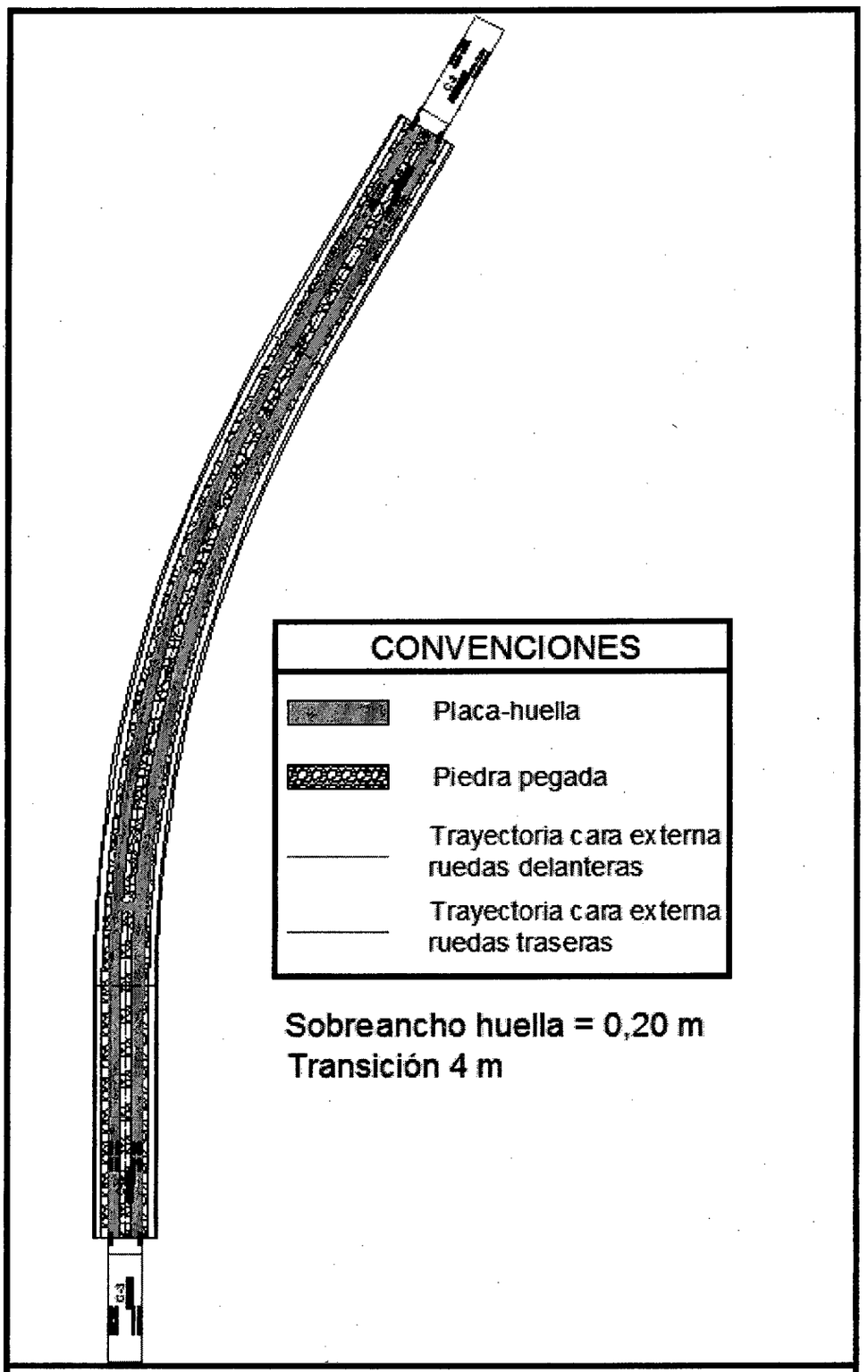


Radio 80 m - Deflexión 150°

0004401 17 OCT 2017

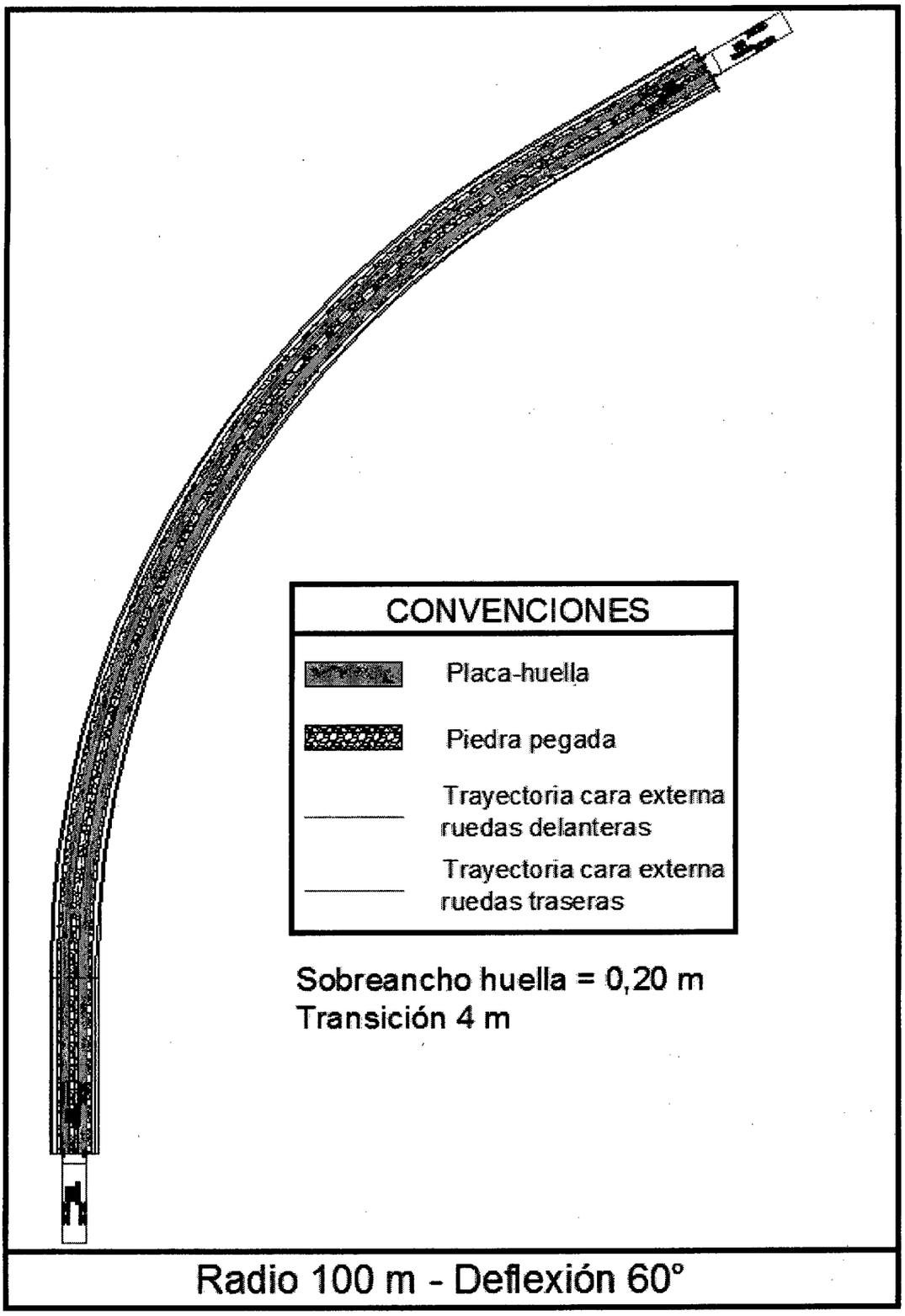
67

0004401 17OCT2017



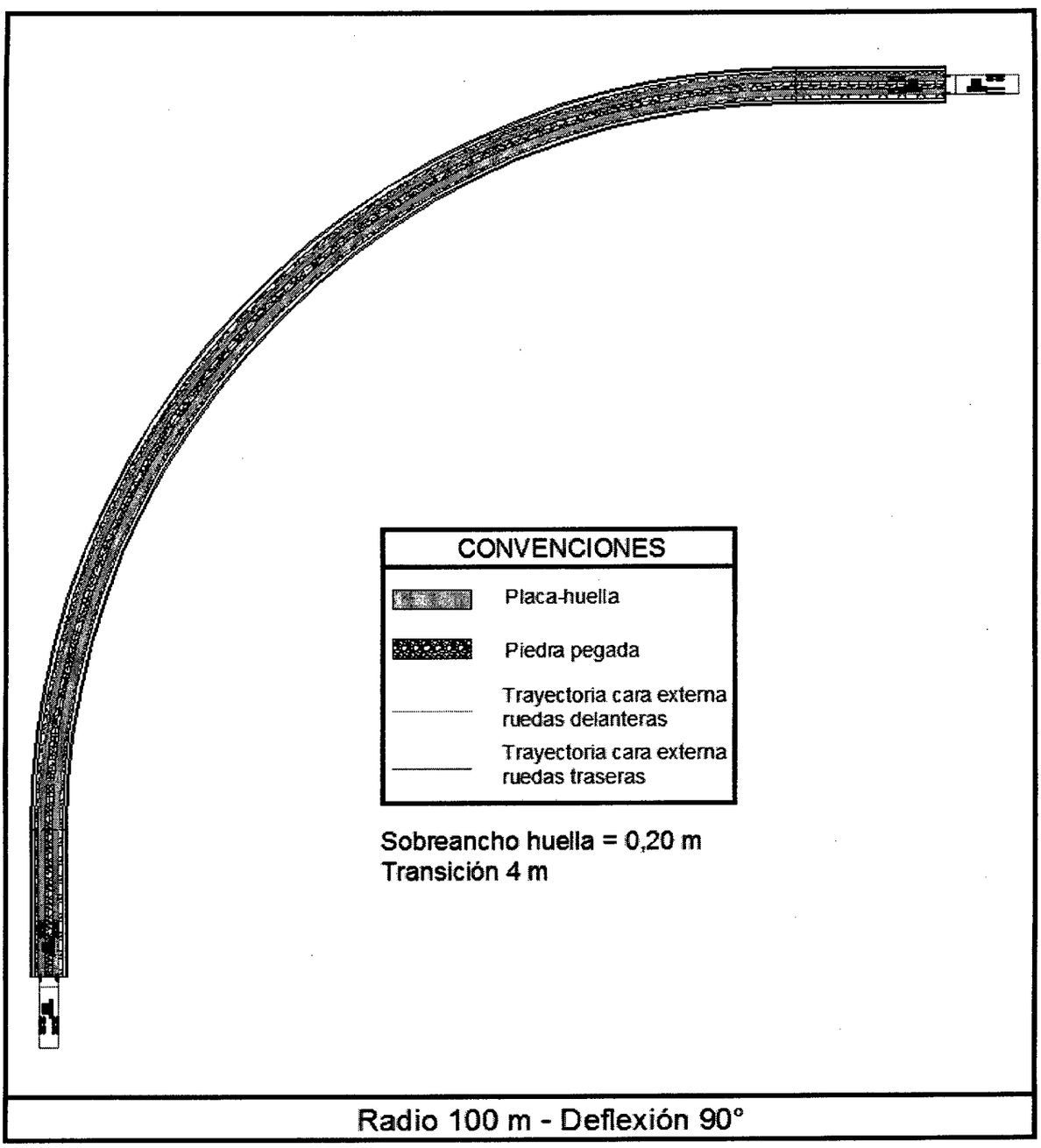
Radio 100 m - Deflexión 30°

0004401 17OCT2017

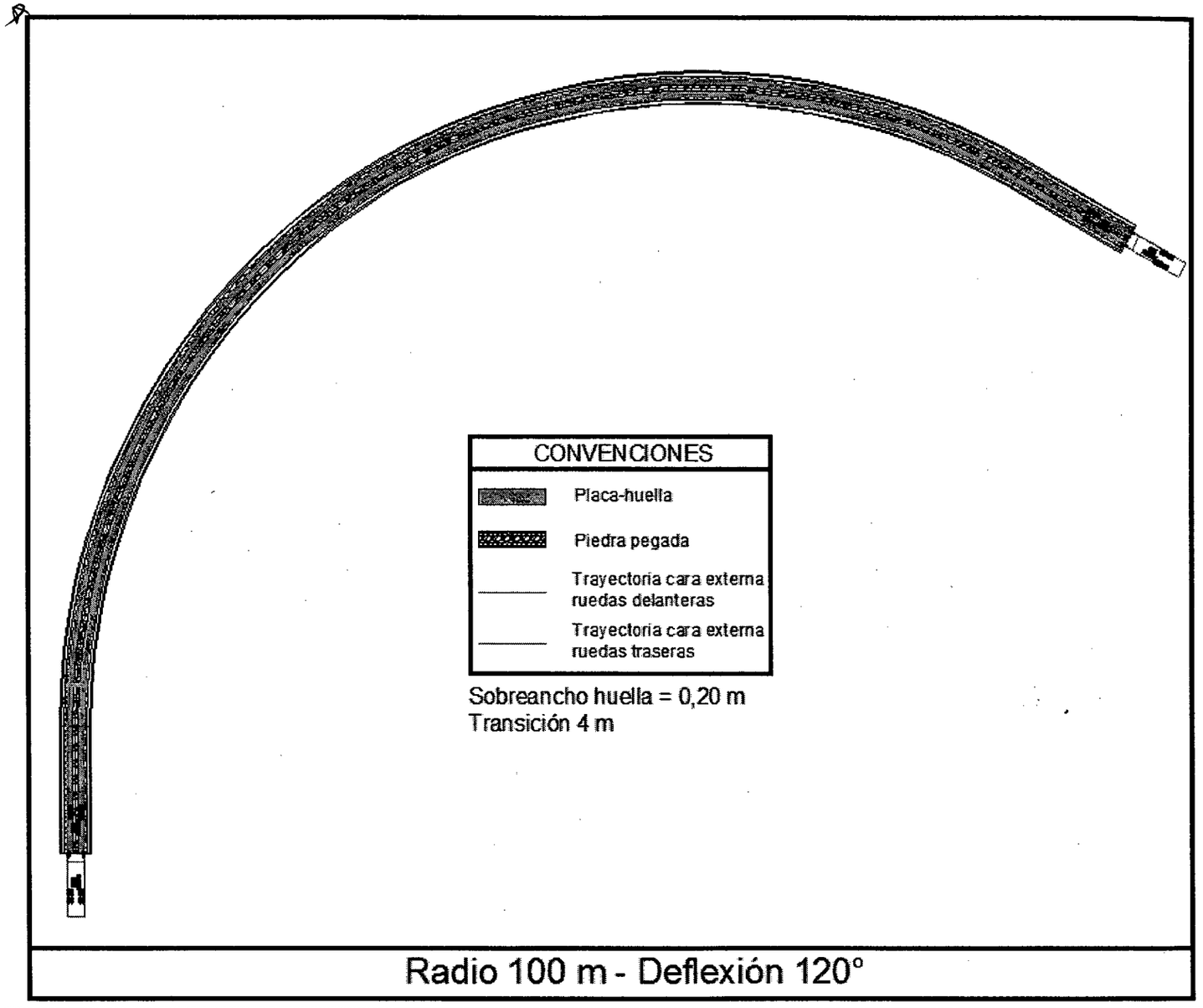


202

0004401 17OCT 2017

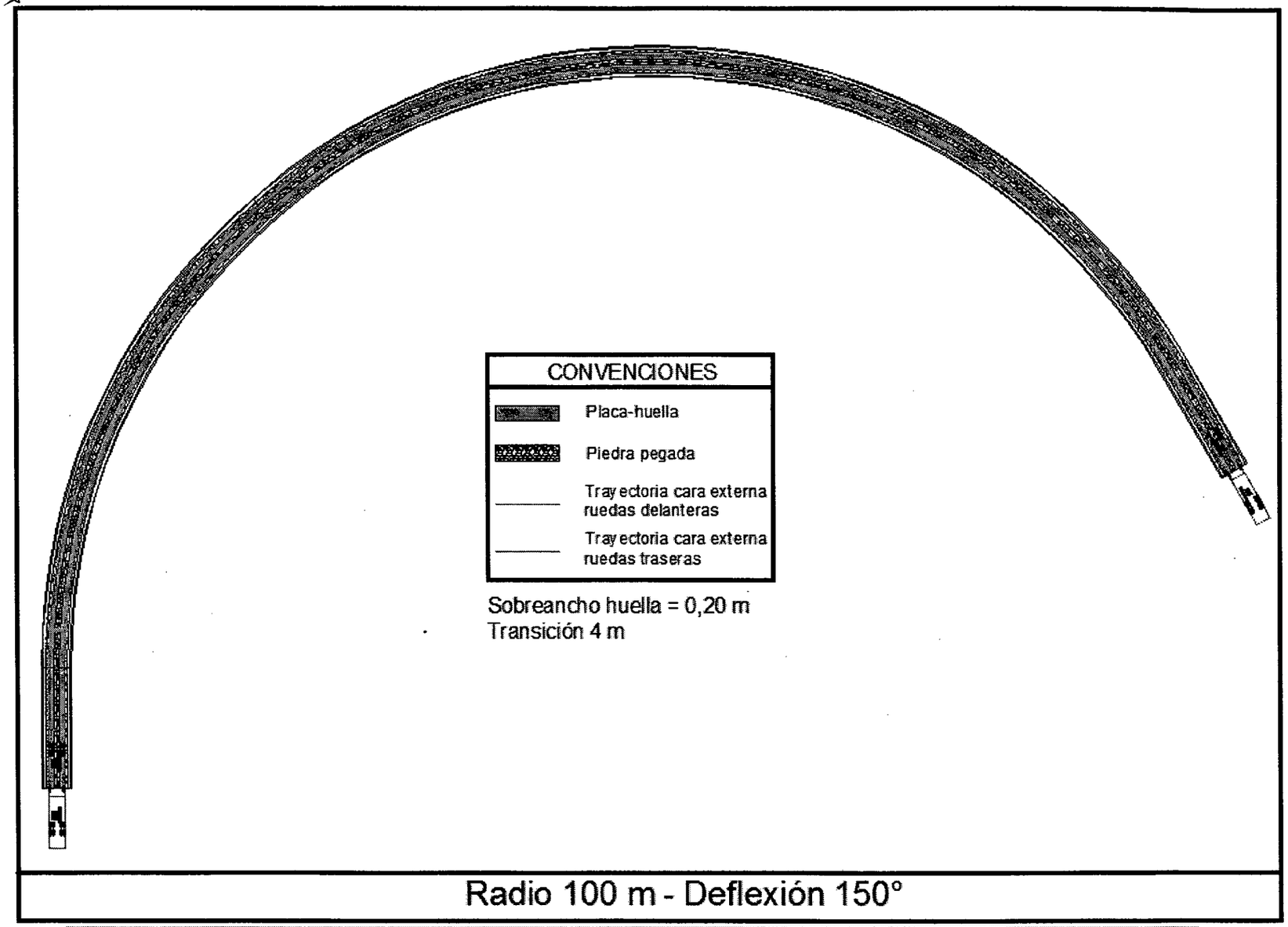


Radio 100 m - Deflexión 90°



Radio 100 m - Deflexión 120°

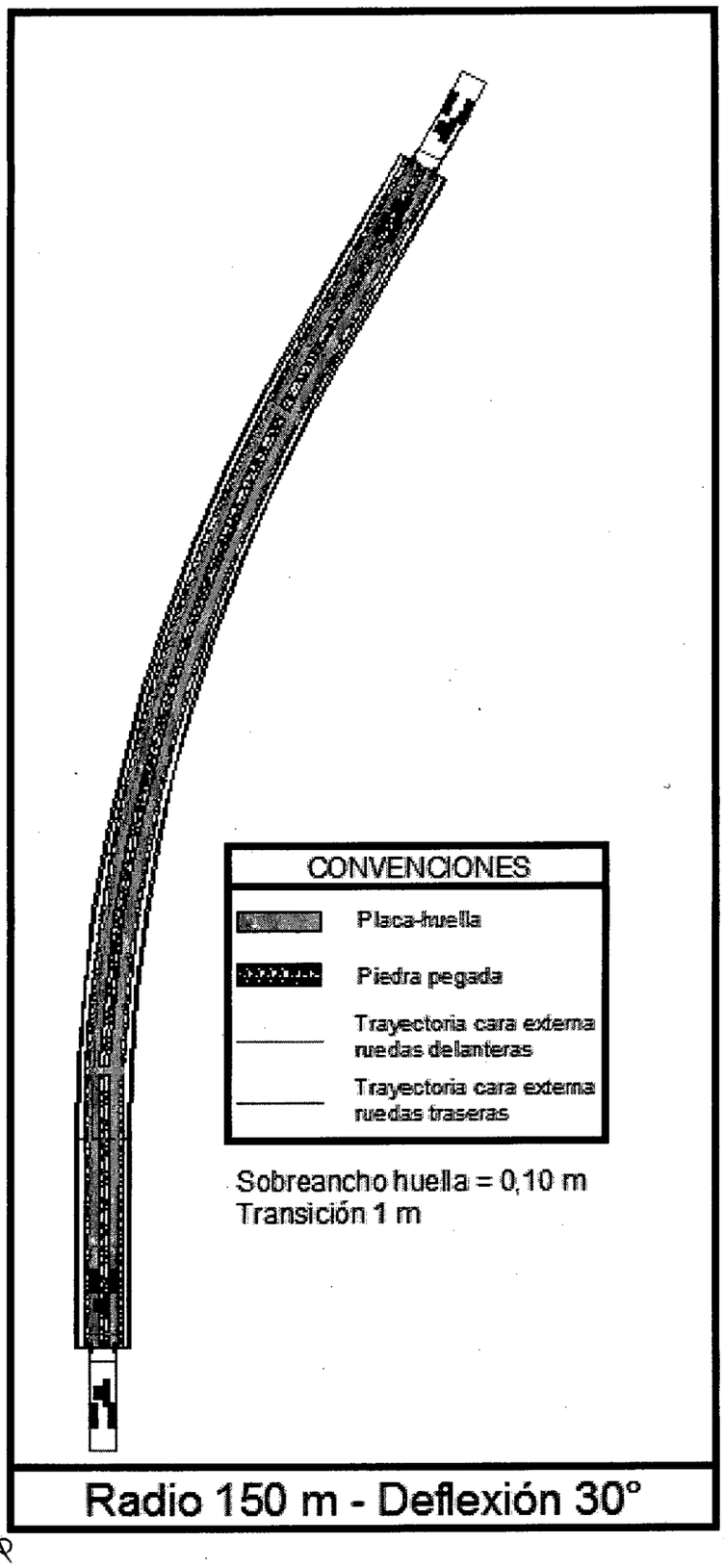
0004401
17 OCT 2017



Radio 100 m - Deflexión 150°

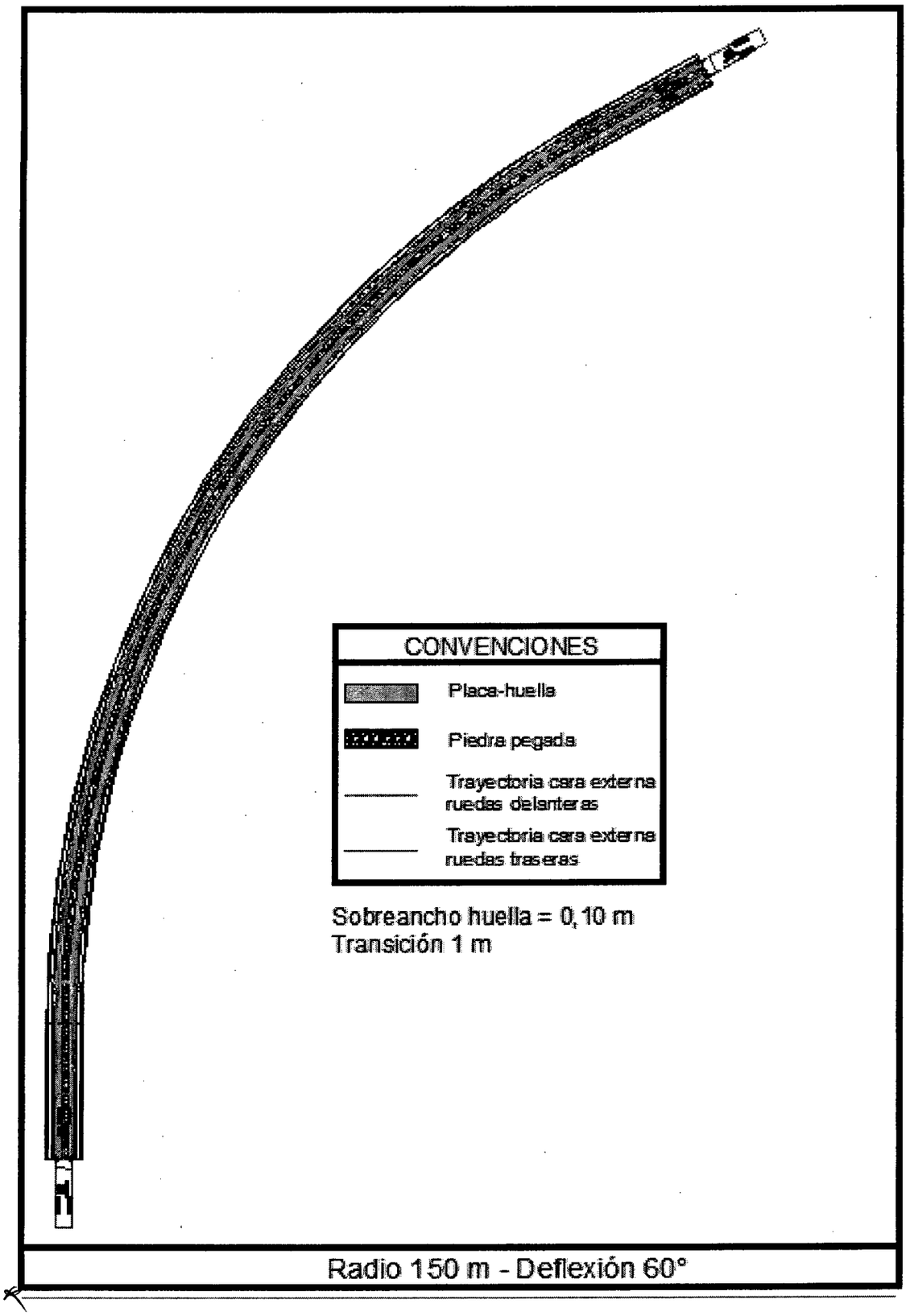
0004401 17OCT2017

0004401 17OCT2017

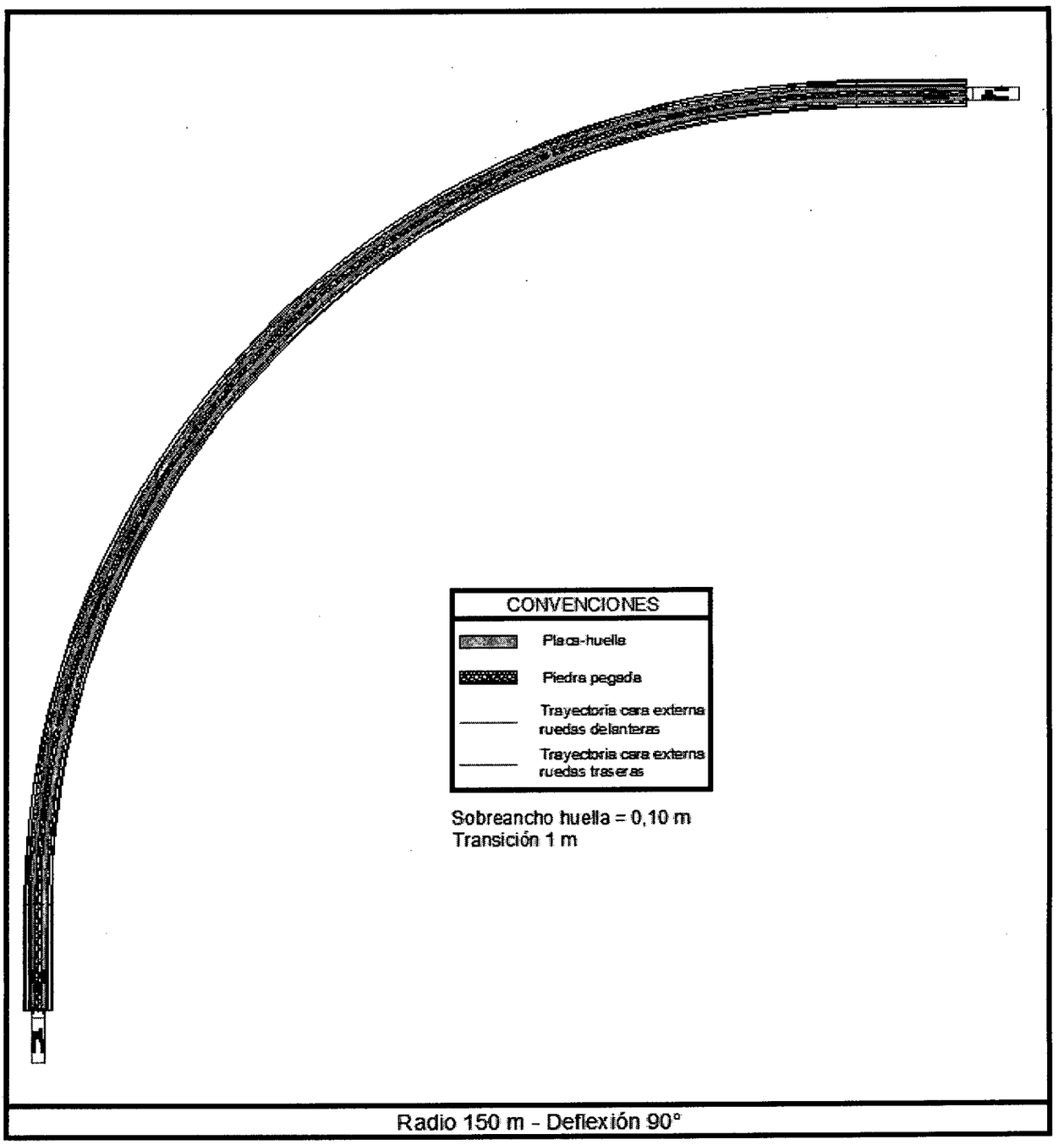


206

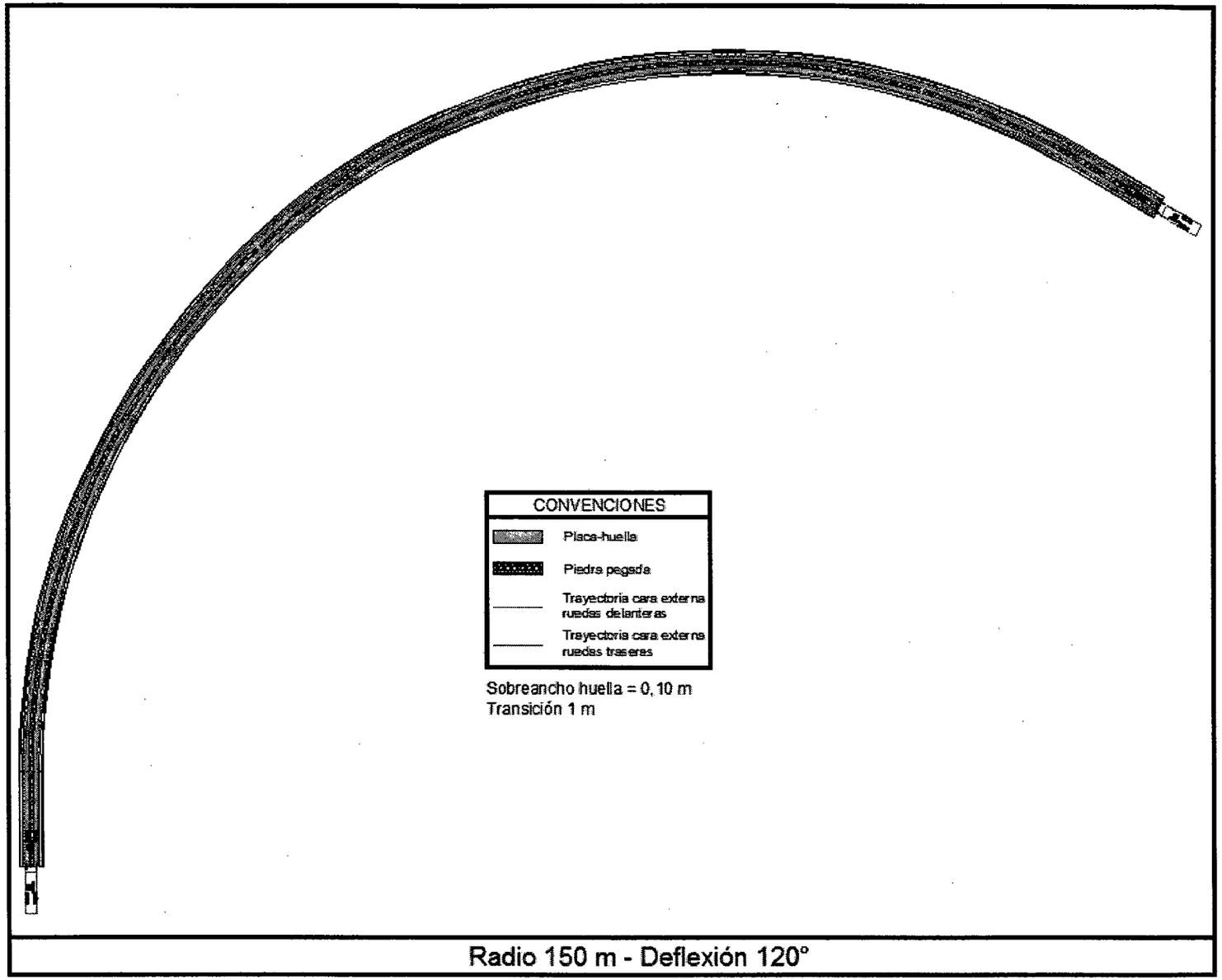
0004401 17OCT2017



0004401 17OCT2017

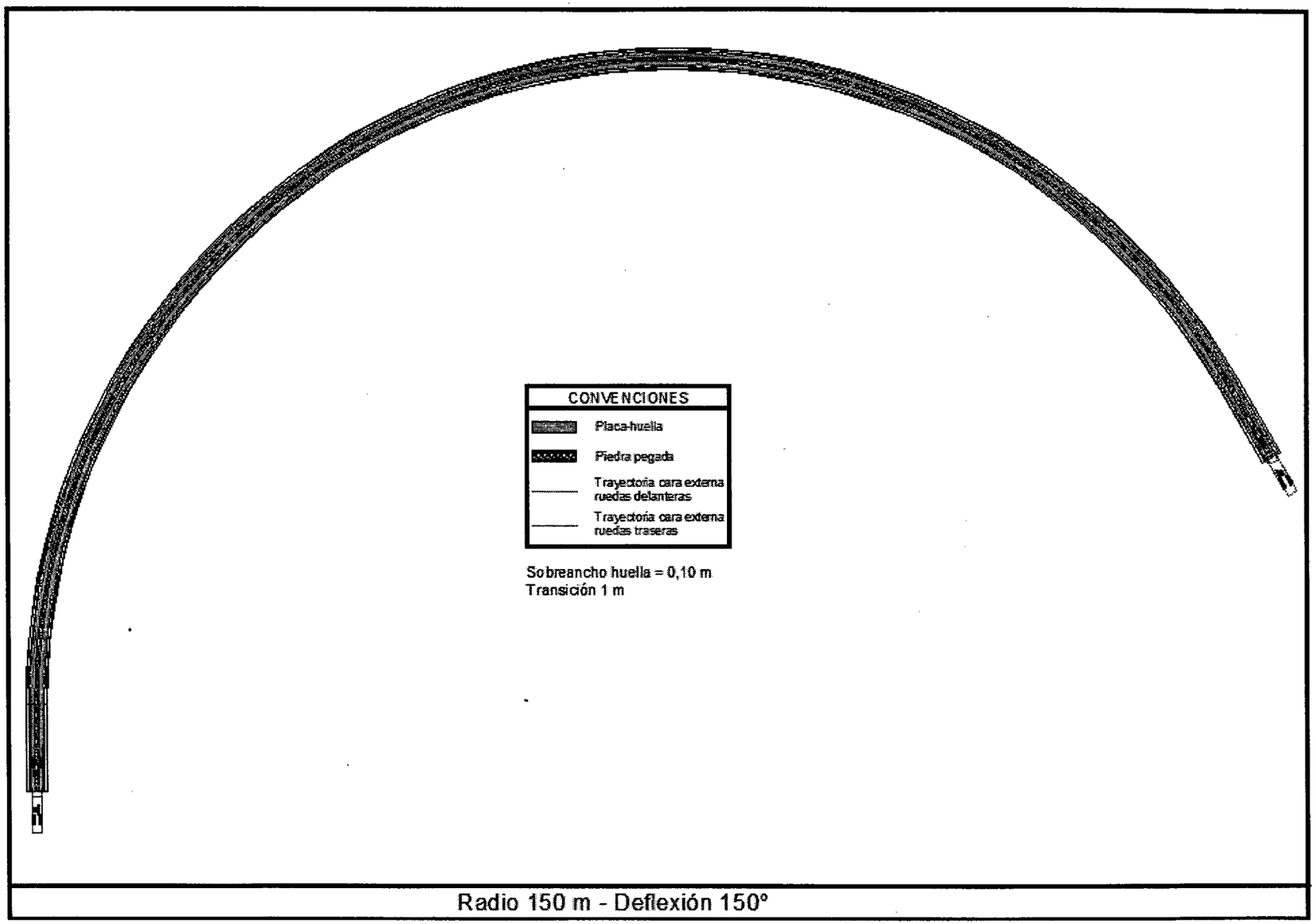


Radio 150 m - Deflexión 90°



Radio 150 m - Deflexión 120°

0004401 17 OCT 2017



Radio 150 m - Deflexión 150°

0004401 17OCT2017

210

0004401 17OCT2017

ANEXO 2.

ANÁLISIS DE PAVIMENTOS EN PLACA-HUELLA DE CONCRETO SIMPLE

Por

Armando Orobio Quiñones

Juan Carlos Orobio Quiñones

Febrero 2016

000440! 17OCT2017

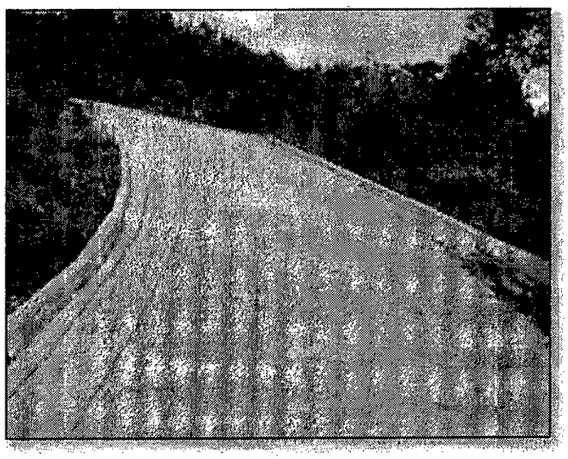
TABLA DE CONTENIDO

Introducción 3
1. Situación actual de la Placa-Huella en Colombia. 4
1.1. Tipos de vehículos que circulan por pavimentos en placa-huella 6
2. Modelación de pavimentos en placa-huella con elementos finitos 3D 7
2.1. Definición del modelo para evaluación 8
3. Resultados de la evaluación 10
3.1. Resultados de la evaluación del modelo 1 10
3.2. Resultados de la evaluación del modelo 2 13
3.2.1. Resultados de la evaluación del modelo 2 con eje SRS 14
3.2.2. Resultados de la evaluación del modelo 2 con eje SRD 14
3.2.3. Resultados de la evaluación del modelo 2 con eje tándem 15
3.3. Análisis de la placa-huella por fatiga y erosión 16
3.3.1. Análisis del pavimento placa-huella por criterio de fatiga 16
4. Conclusiones 21
Referencias 22

0004401 17OCT2017

INTRODUCCIÓN

La Placa-huella en concreto es un sistema de pavimentación para vías de bajos volúmenes de tránsito, en el cual se pavimentan únicamente las huellas por donde circulan las ruedas de los vehículos, la separación entre las franjas de concreto se rellena con piedra pegada, un material con las características de concreto ciclópeo, rocas distribuidas adecuadamente y pegadas con concreto, dependiendo del ancho de la vía se construyen cunetas y bordillos en concreto para proveer la vía de un sistema de drenaje superficial, sí se requiere la separación entre la parte exterior de cada placa-huella y la cuneta se rellena también con piedra pegada (Fotografía 1).



Fotografía 1. Placa - Huella en concreto

El uso de pavimentos en placa-huella de concreto se ha incrementado en Colombia en los últimos años, al parecer, debido a las condiciones climáticas de muchas zonas del país, que hacen que la conservación de vías en afirmado sea poco efectiva, con necesidades de inversión que en la mayoría de los casos no reflejan los esfuerzos en conservación de redes viales terciarias y secundarias que realizan los entes gubernamentales.

La subdirección de redes terciarias del Instituto Nacional de Vías, varios departamentos y municipios colombianos han venido adelantando contratos de pavimentación de vías de bajos volúmenes con pavimentos en placa-huella. Considerando el uso masivo de este tipo de pavimento y que no existe un método unificado de diseño y construcción de los mismos, el Instituto Nacional de Vías – INVIAS contrató mediante concurso de méritos a la firma El Alcarzár SAS, para la elaboración de una **Guía de Diseño de Pavimentos con Placa**

0004401 17OCT2017

Huella. La guía de diseño debe propender por la mejor relación costo-beneficio en el diseño de este tipo de pavimentos y con un periodo de diseño de 20 años.

1. Situación actual de la Placa-Huella en Colombia.

Los pavimentos en placa-huella que se construyen actualmente son en concreto reforzado, en su mayoría regulados por la especificación particular 500 – 1P [1], que aunque al parecer no es una especificación oficial del INVIAS, se ha venido utilizando debido a la ausencia de una mejor especificación.

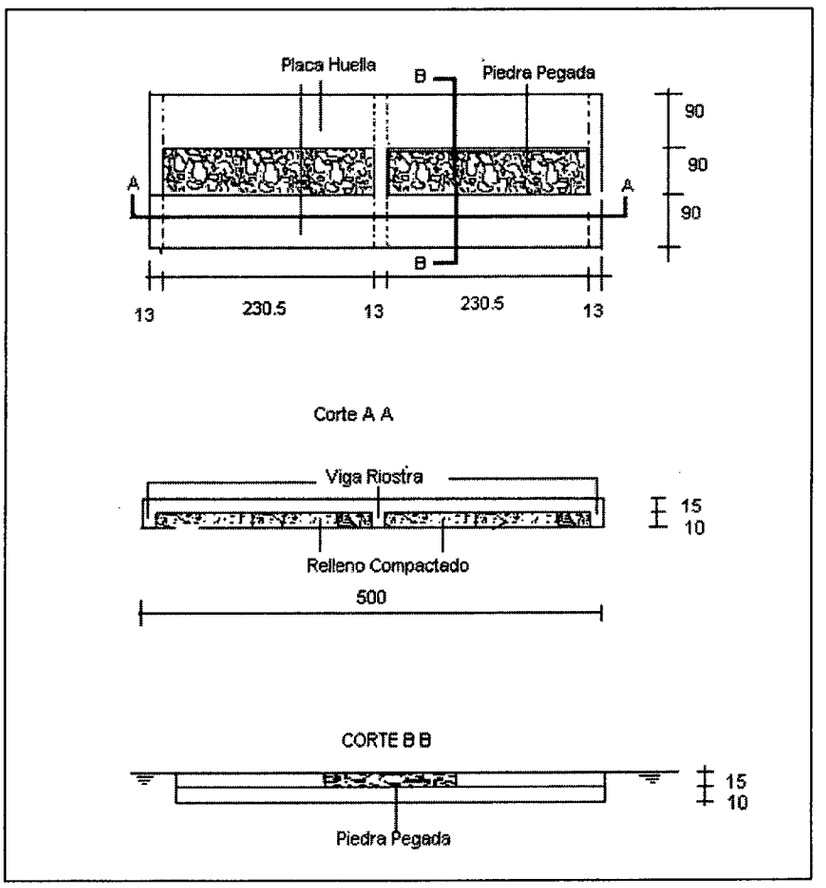


Figura 1. Geometría de Placa-huella de la especificación 500-1P

De acuerdo con la especificación 500-1P, este pavimento consiste en dos placas-huellas paralelas en concreto reforzado y separadas con piedra pegada, con la geometría mostrada en la Figura 1. La dos palcas-huella en concreto reforzado tienen ancho de 0.90 mt cada una, separadas 0.90 mt entre sí, con una longitud de 5.0 mt distribuida entre 3 riostras de 13

0004401 17OCT2017

cm de ancho, una a cada extremo y otra en el centro de las placas-huella, las cuales tienen una longitud de 230.5 cm cada una, medida entre riostras, la separación entre las placas-huella se rellena con piedra pegada, el espesor de la placa-huella es de 15 cm y está apoyada sobre un material de granular de 10 cm de espesor, según la especificación se requiere que este material cumpla como mínimo la especificación de afirmado y tiene como función garantizar adecuado soporte a las placas-huella.

El acero de refuerzo está constituido por una armadura de acero No 2 (1/4") separadas cada 30 cm en las dos direcciones, para las riostras se requiere dos aceros No 3 (3/8") arriba y abajo con estribos de ¼" cada 20 cm.

Aunque la norma es clara en definir la geometría de las placas-huella, en la práctica se encuentran referencias de placas-huella construidas con diferentes espesores, se encuentran diseños en donde se ha calculado el espesor de la placas-huella utilizando el método de diseño de pavimentos de concreto de la PCA (Portland Cement Association), encontrando espesores mucho mayores a los 15 cm requeridos por la especificación 500-1P, pero conservando el refuerzo exigido por la especificación. También se han realizado otras modificaciones en los proyectos que hacen que haya diferencias entra la especificación y lo que finalmente se construye, estos ajustes se hacen para garantizar la estabilidad de la obra y generalmente están del lado de la seguridad, pero reflejan el poco conocimiento que se tiene del comportamiento de este tipo de pavimentos bajo las condiciones específicas de tránsito, geotecnia y clima.

Debido a estas situaciones, los costos de los proyectos se incrementan de manera considerable, superando los montos considerados como razonables para mejoramientos de redes terciarias o secundarias con bajos volúmenes de tránsito. En la actualidad, es común entre constructores y consultores, escuchar planteamientos sobre sí este tipo de pavimento se puede construir de manera más económica, se han planteado preguntas sobre sí es realmente necesario construir placas-huella de concreto reforzadas, sí son necesarias las riostras, sobre cuál es el efecto de diferentes calidades de subrasante, sí el espesor del material granular es suficiente, cuáles son las máximas cargas por ejes que puede soportar, pero quizás la pregunta más importante es que sí se eliminan los elementos que al parecer

215

0004401 17OCT2017

son innecesarios, las placas-huella podrían ser una solución de pavimentación mucho más económica para las vías de bajos volúmenes de tránsito.

Ante todos estos interrogantes, es claro que en la actualidad no se entiende claramente el comportamiento de las placa-huellas de concreto y la interrelación entre las variables de diseño de estos pavimentos, por lo que en el marco del contrato de consultoría para la elaboración de la **Guía de Diseño de Pavimentos con Placa Huella,** se decidió dar respuesta a los interrogantes planteados.

En la presente investigación se analiza el comportamiento de los pavimentos de placa-huella con losas de concreto simple, el análisis se realiza mediante un modelo de elementos finitos tridimensional para analizar la respuesta de las placas-huella a diferentes tipos de ejes vehiculares, con trabazón de agregados o con pasadores de transferencia de carga, diferentes calidades de subrasante y el efecto de gradientes de temperatura. Al final se evalúan criterios de fatiga y erosión para evaluar si es posible realizar la construcción de placas-huellas en concreto simple, bajos las condiciones de tránsito esperadas y cumpliendo con el requisito contractual de 20 años de periodo de diseño.

1.1. Tipos de vehículos que circulan por pavimentos en placa-huella

Los pavimentos en placa huella son utilizados para vías de bajos volúmenes de tránsito en vías de la red terciaria y secundaria. Por tratarse de pavimentos de concreto, en la evaluación de cargas de tránsito lo que importa es el tipo, peso y repeticiones esperadas de los ejes. Los vehículos comerciales que se espera que circulen por pavimentos en placas-huella son el camión C2 y el C3, el camión C2 tiene un eje simple de rueda simple adelante (SRS) y un eje simple de rueda doble atrás (SRD), el camión C3 tiene un eje simple de rueda simple adelante (SRS) y un eje tándem atrás (Figura 2). Los pesos máximos para estos ejes están regulados por la resolución 004100 del 2004 del Ministerio de Transporte [2], sin embargo sería recomendable que se analizará en cada región si estos pesos máximos son adecuados para la red terciaria, debido a que estas cargas podrían resultar considerablemente altas para pavimentos de placa-huella, si estos se quieren diseñar como placas de concreto simple como una alternativa más económica a las placas-huella reforzadas que se construyen actualmente. En pavimentos de placa-huella cada una de las

0004401 17OCT2017

huellas soporta un lado del eje, por lo que para efectos de la presente modelación se consideró una distribución de 50% del peso total del eje en cada huella (semieje).

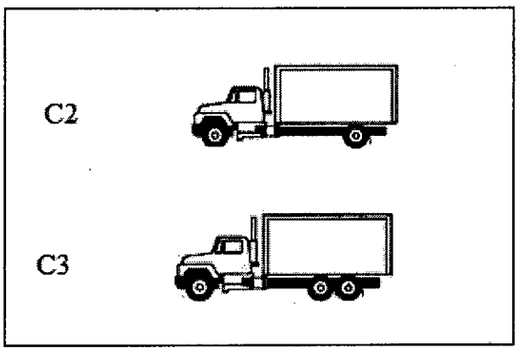


Figura 2. Tipo y peso máximo de los ejes vehiculares

2. Modelación de pavimentos en placa-huella con elementos finitos 3D

Para analizar la respuesta estructural de un sistema de pavimento de concreto se requiere un modelo de respuesta que tenga como mínimo las siguientes características [3]:

- Debe poder analizar losas de cualquier geometría.
- Debe poder analizar sistemas con losa y material de subbase ligados o no ligados, y con diferentes propiedades de los materiales.
- Debe poder analizar pavimentos sobre subrasante solida o liquida.
- Debe poder analizar varias losas con soporte uniforme o no uniforme.
- Debe poder analizar múltiples losas con transferencia de carga en las juntas y fisuras.
- Debe poder analizar losas con diferentes tipos de cargas, incluidos ejes simples y múltiples, diferentes posiciones de carga.
- Debe poder analizar diferentes condiciones de bermas.
- Debe poder analizar sistemas con espesores no uniformes entre losas y bermas.

Las características exigidas para el modelo de respuesta a utilizar para los pavimentos de concreto, son las mismas que las que se requerían para analizar pavimentos en placa-huella de concreto simple, debido a esto se decidió utilizar EverEF 2.25, un software de elementos finitos 3D de uso libre, especializado para modelar pavimentos de concreto, desarrollado en

0004401 17OCT2017

el Departamento de Ingeniería Civil y Ambiental de la Universidad de Maine [4] que cumple con los requerimientos anteriores.

2.1. Definición del modelo para evaluación

Con base en la geometría de los pavimentos en placa-huella descrita anteriormente, se evaluaron dos modelos:

- **Modelo 1**: Este modelo consistió en una placa-huella de concreto de 0.9 mt de ancho, longitud variable entre 3.0 mt y 1.0 mt, y espesor variable entre 0.15 mt y 0.20 mt, la placa-huella estaba soportada sobre una capa granular de 0.15 mt de espesor con módulo de 200 MPa, apoyada sobre una subrasante blanda con módulo resiliente de 20 MPa. Este modelo fue utilizado para analizar el comportamiento de la placa huella ante carga vehicular y gradiente de temperatura (Figura 3), con el fin de identificar las condiciones más críticas. La carga utilizada en este modelo fue un semieje simple de rueda doble de 40 KN (Correspondiente a un eje estándar de 80 KN), con separación entre ruedas de 0.30 mt, la cual se ubicó en diferentes posiciones; Centro-Centro, Centro-Borde y Esquina (Figura 4).

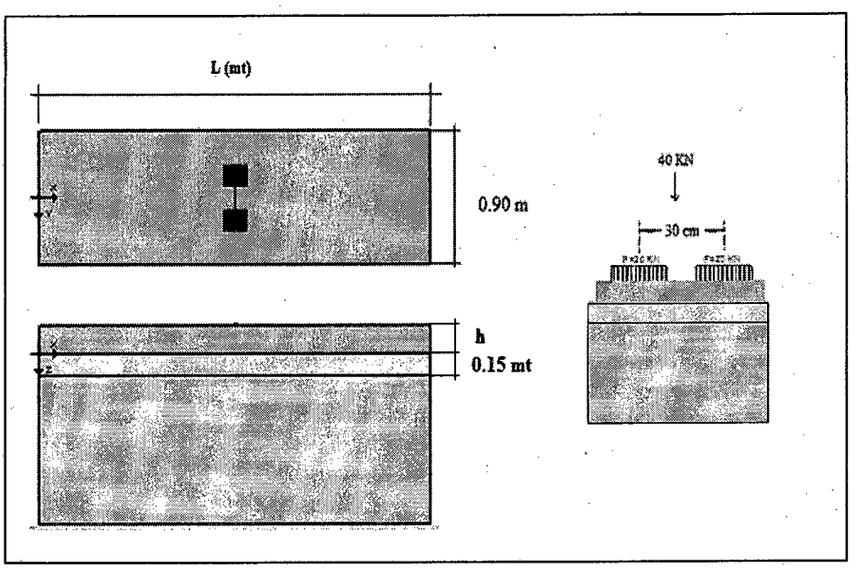


Figura 3. Modelo 1 con semieje simple de rueda doble en posición centro-centro

0004401 17OCT2017

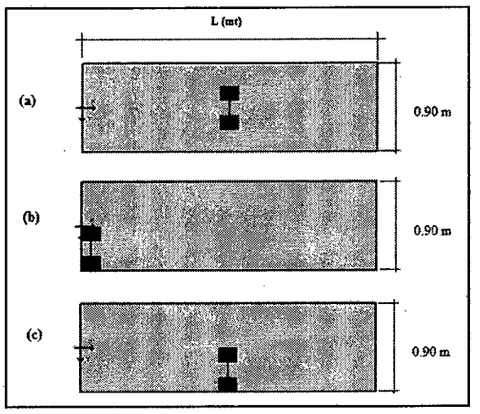


Figura 4. Modelo 1 con cargas centro-centro (a), esquina (b) y centro-borde (c).

- **Modelo 2:** Este modelo se utilizó para hacer análisis posteriores a la identificación de las condiciones más críticas identificadas con el modelo 1; el modelo 2 consistió en evaluar placas-huella de longitud corta, de 1.0 mt de longitud. Se evaluaron tres placas-huellas cortas unidas mediante trabazón de agregados o con pasadores de transferencia de carga. Este modelo se evaluó con cargas del semieje simple de rueda simple (27 kN), semieje simple de rueda doble (50 kN) y semieje tándem (100 kN). Con los ejes simples se utilizó la carga en posición Borde-Centro (Figura 5), que resultó ser la más crítica entre todas las posiciones evaluadas; Centro-Centro, Centro-Borde y Esquina. Con el eje tándem la posición más crítica resultó ser cuando una de las ruedas dobles del tándem está en posición borde-centro de la placa-huella (Figura 6).

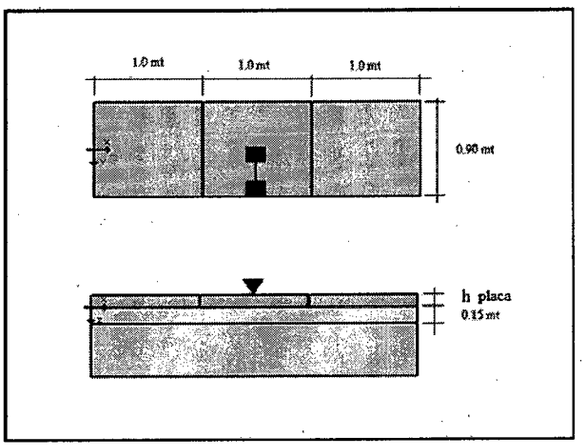


Figura 5. Modelo 2 con semieje simple de rueda doble en posición centro-borde

0004401 17OCT2017

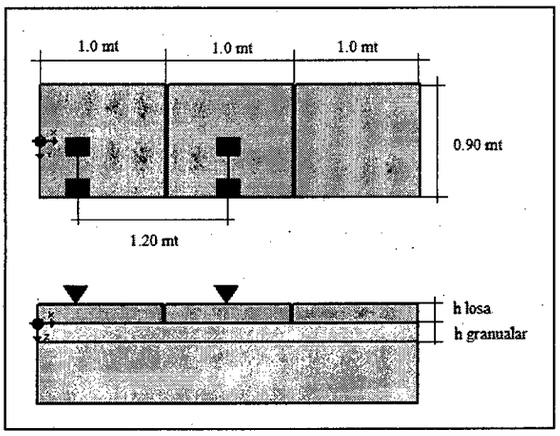


Figura 6. Modelo 2 con semieje tándem de rueda doble

3. Resultados de la evaluación

Con el propósito de entender mejor el comportamiento de los pavimentos de placa-huella y evaluar la posibilidad de construir pavimentos de placa-huella en concreto simple, eliminar los requerimientos de las cuantías de acero, facilitar la construcción y reducir los costos de este tipo de pavimentos, se evaluaron ambos modelos (modelo 1 y modelo 2) bajo diferentes condiciones.

Este tipo de pavimento debe evaluarse bajo los criterios de falla por carga última, fatiga y erosión, que son determinantes para el diseño del espesor mínimo de la placa. Además debe estudiarse el efecto del gradiente de temperatura en los esfuerzos de las placas, fenómeno de alabeo.

3.1. Resultados de la evaluación del modelo 1

El modelo 1 se evaluó para placas-huellas de diferentes longitudes y espesores, con carga en las tres posiciones estudiadas (Centro-Centro, Centro-Borde y Esquina). La Tabla 1 muestra los resultados de los máximos esfuerzos de tensión obtenidos para las longitudes y espesores de placa evaluados, en todos los casos el esfuerzo máximo de tensión se presenta cuando la carga está ubicada en la posición centro-borde. En cada longitud de placa-huella evaluada, el esfuerzo disminuye con el incremento del espesor de la placa. Cuando se comparan los esfuerzos entre las diferentes longitudes, se encuentra que a menor longitud de la placa-huella, menor es el esfuerzo máximo de tensión al comparar placas del mismo espesor. Para efectos prácticos, si se reduce la longitud de la placa-huella se logran

0004401 17OCT2017

esfuerzos máximos de tensión menores, si se desea hacer una evaluación rápida de la magnitud de los esfuerzos calculados, se puede tomar como referencia el módulo de rotura del concreto (MR), los pavimentos de concreto generalmente se diseñan para MR entre 3.8 MPa y 4.5 MPa [5], para el caso de los pavimentos en placa-huella, que son para vías rurales y que generalmente se construyen con concreto hecho en obra, resulta conveniente requerir un valor bajo de MR, es conveniente emplear un factor de seguridad para reducir el máximo esfuerzo admisible antes de que el pavimento se fisure por carga última, sólo para efectos del presente análisis se tomará como referencia un MR de 3.0 MPa, que significaría trabajar con el 80% del valor de MR de 3.8 MPa.

Tabla 1. Esfuerzo máximo de tensión (MPa) para diferentes posiciones de carga

Longitud (m)	Espesor (m)	Centro-Centro	Esquina	Centro-Borde	Centro-Borde (L + °T)
3.0	0.15	3.53	2.91	4.39	5.19
	0.16	3.25	2.67	4.01	4.74
	0.17	3.00	2.45	3.70	4.34
	0.18	2.77	2.25	3.39	3.98
	0.19	2.57	2.07	3.12	3.65
	0.20	2.38	1.90	2.88	3.36
2.5	0.15	3.27	2.65	4.17	4.80
	0.16	2.98	2.40	3.77	4.35
	0.17	2.73	2.18	3.43	3.95
	0.18	2.50	1.98	3.13	3.59
	0.19	2.30	1.81	2.86	3.25
	0.20	2.11	1.66	2.63	2.98
2.0	0.15	2.89	2.26	3.74	4.22
	0.16	2.61	2.02	3.36	3.79
	0.17	2.37	1.82	3.04	3.42
	0.18	2.15	1.64	2.75	3.10
	0.19	1.97	1.48	2.51	2.82
	0.20	1.80	1.35	2.29	2.57
1.5	0.15	2.39	1.74	3.18	3.51
	0.16	2.14	1.55	2.83	3.13
	0.17	1.92	1.38	2.54	2.82
	0.18	1.74	1.24	2.30	2.54
	0.19	1.57	1.12	2.08	2.30
	0.20	1.44	1.01	1.89	2.09
1.0	0.15	1.75	1.47	2.43	2.66
	0.16	1.55	1.30	2.17	2.37
	0.17	1.39	1.16	1.95	2.13
	0.18	1.25	1.04	1.76	1.92
	0.19	1.13	0.94	1.59	1.74
	0.20	1.03	0.85	1.44	1.58

L: Carga °T: Gradiente de temperatura

Cuando se compara el esfuerzo máximo de tensión (columna Centro-borde de la Tabla 1) con el valor de 3.0 MPa, se observa que si se quiere evitar la falla por carga última de la

0004401 17OCT2017

placa- huella bajo las condiciones de carga estudiadas, sería posible utilizar placas-huella de longitud 3.0 mt con espesores superiores a 0.20 mt, de 2.5 mt con espesor superior a 019 mt, de 2.0 mt con espesor superior a 0.18 mt, de 1.5 mt con espesor superior a 0.16 mt y de 1.0 mt con espesor superior a 0.15 mt. Sin embargo se debe considerar el efecto del gradiente de la temperatura en los esfuerzos de la placa.

En las dos últimas columnas centro-borde y centro-borde (L+°T) de la Tabla 1, la primera columna (centro-borde) muestra esfuerzos de tensión cuando la carga está en la posición más crítica centro-borde, la segunda columna (centro-borde L+°T), presenta los resultados del efecto combinado de carga y gradiente de temperatura sobre el esfuerzo máximo de tensión, la carga se ubica en la posición más crítica (Centro-Borde) y se considera un gradiente de temperatura de 5 °C, -5 °C. El comportamiento de los esfuerzos de estas dos columnas se presenta en la Figura 6, (a) centro-borde y (b) centro-borde (L+°T).

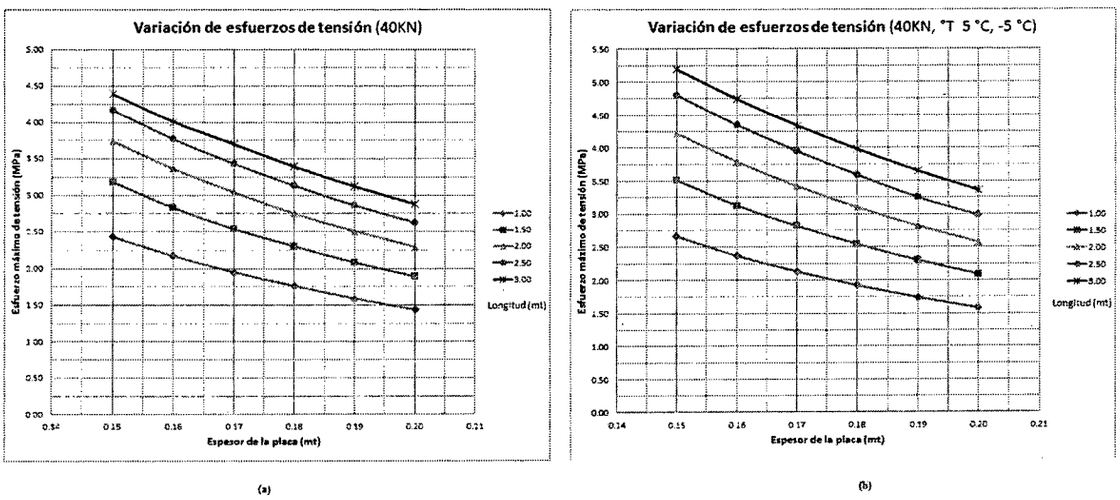


Figura 7. Esfuerzos máximos de tensión del modelo 1

Al comparar estas dos columnas, se observa que al considerar el gradiente de temperatura se produce un incremento del esfuerzo máximo de tensión para todas las longitudes y espesores estudiados. Dentro de una misma longitud de Placa-huella, el efecto del gradiente de temperatura es menor a medida que se incrementa el espesor de la placa. Cuando se comparan diferentes longitudes, el efecto de gradiente de temperatura disminuye considerablemente con la disminución de la longitud de la Placa-huella. Este último

000440 17OCT2017

comportamiento toma gran importancia debido a que existe muy poca información sobre gradientes de temperatura en pavimentos de concreto en Colombia, lo que dificultaría enormemente considerar este parámetro en la práctica, por lo que sería mejor controlar el efecto del gradiente de temperatura controlando la longitud de las placas-huella. Esta forma de controlar el efecto del gradiente de temperatura en losas de concreto ha sido utilizada en métodos de diseño de pavimentos de concreto [5].

El efecto de la calidad de la subrasante también fue investigado con el modelo 1, la Figura 8 muestra los resultados para placas-huella de diferentes espesores y longitudes de 1.0 mt y 2.0 mt, sobre 15 cm de material granular de 100 MPa de módulo resiliente, sobre subrasantes de módulos resilientes de 20, 30, 40, y 50 MPa, con carga de SRD de 50 kN en posición centro-borde.

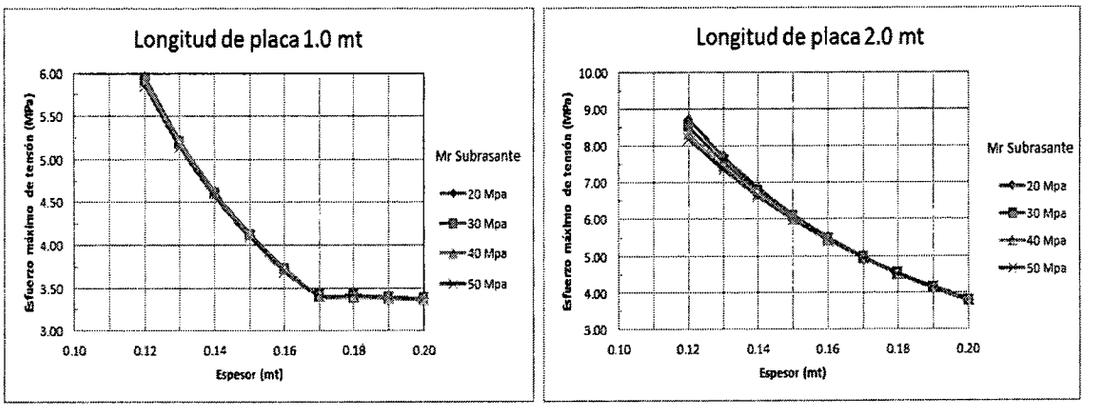


Figura 8. Efecto de la subrasante

En la figura 8 se puede apreciar que para las condiciones evaluadas existe poca sensibilidad del esfuerzo máximo a tensión con respecto al módulo resiliente de la subrasante. Para la longitud de placa-huella de 1.0 mt el efecto es despreciable, para la longitud de placa-huella de 2.0 mt se pueden observar diferencias para espesores inferiores a 0.14 mt, pero espesores inferiores a 0.15 mt presentan esfuerzos máximos de tensión demasiado altos en relación con el valor de referencia del estudio de 3.0 MPa.

3.2. Resultados de la evaluación del modelo 2

000440 17OCT2017

El modelo 2 se evaluó con diferentes espesores de placa y diferentes módulos resilientes de la subrasante, para ejes SRS, SRD y Tándem, la longitud de placa fue fijada en 1.0 mt con base en los resultados de los análisis hechos con el modelo 1.

3.2.1. Resultados de la evaluación del modelo 2 con eje SRS

Cuando evalúa el modelo 2 con un semieje SRS de 27 kN ubicado en la posición crítica centro-borde, en la placa central y con trabazón de agregados entre las placas, para módulos de subrasante entre 30 MPa y 100 MPa, los esfuerzos máximos de tensión resultan inferiores a 3.0 MPa para espesores de placa de 0.15 mt o superiores (Figura 9), valor tomado como referencia en este análisis para falla por carga última, lo que indica que para ejes livianos este tipo de pavimento no fallaría por este criterio.

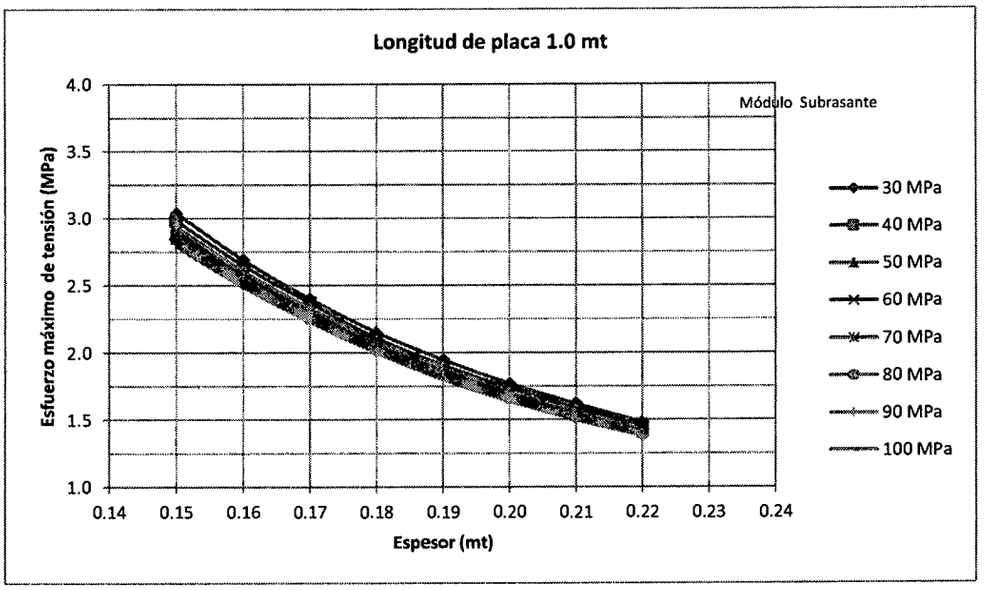


Figura 9. Esfuerzo máximo de tensión en función del espesor de placa (modelo 2, Eje SRS de 27 kN)

3.2.2. Resultados de la evaluación del modelo 2 con eje SRD

La Figura 10 presenta la variación del esfuerzo máximo de tensión con relación al espesor de la losa para diferentes módulos resilientes de subrasante entre 20 MPa y 80 MPa, los esfuerzos son para un semieje SRD de 50 kN en la posición crítica centro-borde en la placa central y trabazón de agregados entre las placas. En la Figura 10 se observa que para todas las calidades de subrasante evaluadas, para espesores de losa de 0.17 mt los esfuerzos máximos de tensión son del orden de 3.0 MPa. Pavimentos en placa- huella de concreto

0004401 17OCT2017

simple, con espesores inferiores a 0.17 mt no serían viables bajo las condiciones del presente análisis.

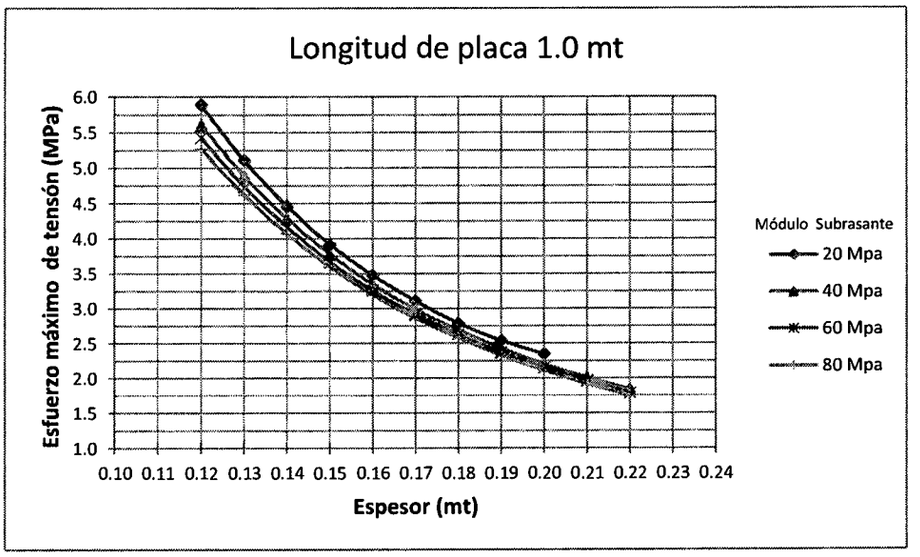


Figura 10. Esfuerzo máximo de tensión en función del espesor de placa (modelo 2, Eje SRD 50 kN)

En el análisis se observó que cuando se evalúa una placa aislada, sin considerar el confinamiento de las placas adyacentes, los esfuerzos de tensión máximos resultantes son menores, pero esta condición no representaría el funcionamiento real del pavimento. También se observó que no hay variaciones significativas en el esfuerzo máximo de tensión cuando se utilizan pasadores de carga en las juntas entre placas, esto representaría una ventaja constructiva porque el constructor podría pensar en fundir placas largas y cortarlas a un metro de largo tan pronto el concreto alcance la resistencia suficiente.

3.2.3. Resultados de la evaluación del modelo 2 con eje tándem

Al evaluar el modelo 2 con un semieje tándem de 100 kN, 50 kN en cada rueda doble del semieje del tándem, con uno de los ejes del tándem ubicado en la posición crítica centro-borde de la placa central y en otro eje del tándem en la placa adyacente (Figura 6), con trabazón de agregados entre las placas, diferentes espesores de placas y módulos de subrasante entre 30 MPa y 100 MPa, se observa que los esfuerzos máximos de tensión en placas de espesor 0.17 mt o superior son inferiores al valor de referencia de 3.0 MPa para todas las calidades de subrasante (Figura 11), lo que implica que bajo un eje tándem con las

0004401 17OCT2017

características estudiadas, placas-huellas de espesores superiores a 0.17 mt no fallarían por carga última.

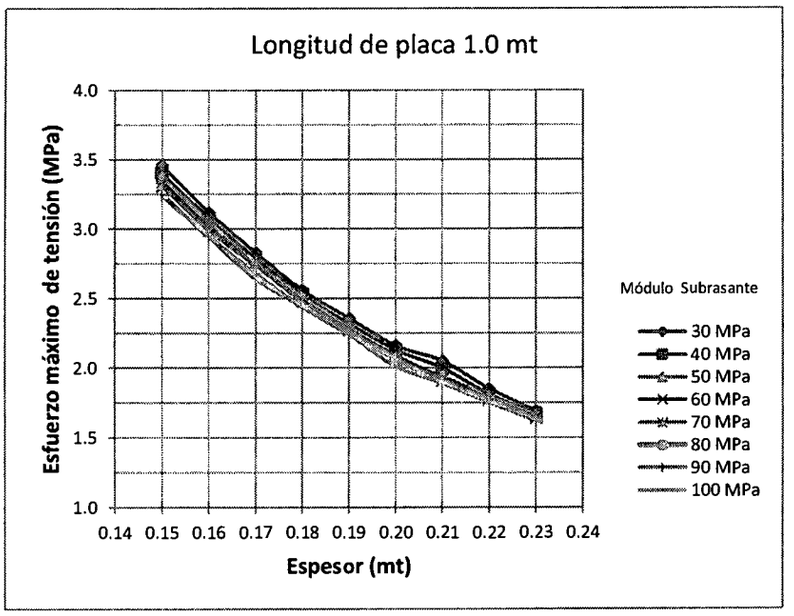


Figura 11. Esfuerzo máximo de tensión en función del espesor de placa (modelo 2, Eje tándem 100 kN)

Se identificó que se presenta un contacto entre las esquinas inferiores de las placas, bajo el borde cargado que está en contacto con el material granular de soporte, generando unos esfuerzos altos en esos puntos que podrían inducir a la falla de la esquina (despicadura), sin embargo se asume que una vez esta falla ocurre, la integridad de la placa no se ve mayormente afectada y los esfuerzos máximos se presentarían en el punto esperado.

3.3. Análisis de la placa-huella por fatiga y erosión

Los criterios de diseño de pavimentos de concreto son la fatiga y la erosión, si se quiere evaluar la posibilidad de diseñar pavimentos en placa-huella de concreto simple, estos dos criterios deben ser evaluados considerando las características de este tipo de pavimento.

3.3.1. Análisis del pavimento placa-huella por criterio de fatiga

La fatiga es la falla del concreto debida a carga repetida, la falla ocurre mediante la fisuración de la losa de concreto. En pavimentos la fatiga se mide en vigas de concreto simplemente apoyadas, sometidas a ensayo de carga repetida en los tercios de la luz libre, el tiempo de iniciación de la fisura depende en gran medida de la magnitud del esfuerzo,

225

0004401 17OCT2017

cuando el esfuerzo aplicado es muy inferior al módulo de rotura del concreto no se produce la falla por fatiga. Se ha definido que esto ocurre con una relación de esfuerzo de 0.5, que es el cociente del esfuerzo aplicado y el módulo de rotura del concreto [6].

El análisis por fatiga de la placa-huella se realizó utilizando la ecuación recomendada por la Portland Cement Association – PCA [7].

$$Log\, N_f = 11.737 - 12.077\left(\frac{\sigma}{S_c}\right) \qquad para \quad \frac{\sigma}{S_c} \geq 0.55 \qquad \text{Ecuación 1}$$

$$N_f = \left(\frac{4.2577}{\frac{\sigma}{S_c} - 0.4325}\right)^{3.268} \qquad para \quad 0.45 < \frac{\sigma}{S_c} < 0.55 \qquad \text{Ecuación 2}$$

$$N_f = Ilimitado \qquad para \quad \frac{\sigma}{S_c} \leq 0.45 \qquad \text{Ecuación 3}$$

Donde,

N_f : Número de repeticiones de carga permitidas

σ: es el esfuerzo de tensión aplicado

S_c: es el módulo de rotura del concreto

$\frac{\sigma}{S_c}$: Relación de esfuerzo

Con base en el modelo 2 se evaluó la fatiga para placa-huellas de 1.0 mt de longitud con varios espesores placa entre 0.17 mt y 0.23 mt y diferentes módulos resilientes de subrasante entre 30 MPa y 100 MPa. Se analizaron eje SRS, SRD y Tándem, las cargas utilizadas fueron las del semieje, considerando una distribución de 50% del peso total a cada lado del eje.

En la Tabla 2 se presenta en esfuerzo crítico en posición centro-borde, las repeticiones admisibles y el número promedio de ejes diarios permitido para un periodo de 20 años. Si se revisa el promedio de ejes diarios permitidos para un periodo de 20 años, los datos de la tabla indican que para vías con tránsito de bajo y ejes livianos (SRS), las placas-huella de 1.0 mt de longitud, en concreto simple, con espesores 18 cm o superior podrían ser una alternativa, pero si se espera tener ejes SRD o tamden el espesor requerido debería ser 20 cm. Por ejemplo, si por una vía circula un camión C3 (1 SRS + 1 Tándem) 5 veces al día, si la subrasante tiene módulo de 30 MPa, el espesor de la placa huella debería ser de mínimo 20 cm, que es el requerimiento del eje tándem. Si se chequea el eje SRS este espesor podría soportar hasta 176 repeticiones de ese eje en 20 años.

0004401 17OCT2017

Tabla 2. Análisis de fatiga para placa-huella de 1.0 mt de largo y módulo de rotura de 3.8 MPa

		Semieje SRS (27 kN)			Semieje SRD (50 kN)			Semieje Tandem (100 kN)		
Módulo de Subrasante (MPa)	Espesor Placa (Cm)	Esfuerzo (MPa)	# Repeticiones Admisibles	# Ejes diarios en 20 años	Esfuerzo (MPa)	# Repeticiones Admisibles	# Ejes diarios en 20 años	Esfuerzo (MPa)	# Repeticiones Admisibles	# Ejes diarios en 20 años
30	17	2.52	5,837	1	3.06	90	0	2.83	277	0
	18	2.26	40,886	6	2.76	833	0	2.56	1,995	0
	19	2.05	166,533	23	2.50	5,837	1	2.36	8,620	1
	20	1.86	1,286,914	176	2.28	30,960	4	2.16	37,252	5
	21	1.70	Ilimitadas	Ilimitadas	2.08	124,351	17	2.05	84,613	12
	22	1.55	Ilimitadas	Ilimitadas	1.90	762,043	104	1.85	773,906	106
	23				1.75	14,335,236	1,964	1.69	Ilimitadas	Ilimitadas
40	17	2.49	7,708	1	3.00	157	0	2.79	371	0
	18	2.22	53,993	7	2.70	1,453	0	2.53	2,484	0
	19	2.01	229,127	31	2.45	10,179	1	2.32	11,552	2
	20	1.83	2,402,754	329	2.23	40,886	6	2.13	46,397	6
	21	1.67	Ilimitadas	Ilimitadas	2.04	166,533	23	2.00	129,932	18
	22	1.53	Ilimitadas	Ilimitadas	1.87	1,286,914	176	1.81	1,564,102	214
	23				1.72	Ilimitadas	Ilimitadas	1.67	Ilimitadas	Ilimitadas
50	17	2.45	10,179	1	2.95	207	0	2.76	462	0
	18	2.19	53,993	7	2.67	1,919	0	2.51	2,876	0
	19	1.98	326,334	45	2.41	13,443	2	2.29	14,388	2
	20	1.81	2,402,754	329	2.20	53,993	7	2.06	78,153	11
	21	1.65	Ilimitadas	Ilimitadas	2.01	229,127	31	1.94	237,285	33
	22	1.50	Ilimitadas	Ilimitadas	1.84	2,402,754	329	1.79	2,376,236	326
	23				1.69	Ilimitadas	Ilimitadas	1.66	Ilimitadas	Ilimitadas
60	17	2.43	10,179	1	2.91	274	0	2.74	534	0
	18	2.16	71,303	10	2.63	2,534	0	2.49	3,329	0
	19	1.96	326,334	45	2.38	13,443	2	2.28	15,480	2
	20	1.79	5,202,474	713	2.17	71,303	10	2.09	62,176	9
	21	1.63	Ilimitadas	Ilimitadas	1.98	326,334	45	1.93	265,438	36
	22	1.49	Ilimitadas	Ilimitadas	1.81	2,402,754	329	1.78	2,993,873	410
	23				1.67	Ilimitadas	Ilimitadas	1.65	Ilimitadas	Ilimitadas
70	17	2.39	13,443	2	2.87	362	0	2.74	534	0
	18	2.15	71,303	10	2.59	3,347	0	2.48	3,582	0
	19	1.95	485,184	66	2.35	17,753	2	2.27	16,655	2
	20	1.77	5,202,474	713	2.14	94,163	13	2.08	67,047	9
	21	1.62	Ilimitadas	Ilimitadas	1.96	326,334	45	1.91	336,255	46
	22	1.48	Ilimitadas	Ilimitadas	1.76	14,335,236	1,964	1.77	3,838,973	526
	23				1.64	Ilimitadas	Ilimitadas	1.64	Ilimitadas	Ilimitadas
80	17	2.37	17,753	2	2.84	478	0	2.70	716	0
	18	2.13	94,163	13	2.56	4,420	1	2.46	4,147	1
	19	1.93	485,184	66	2.33	23,444	3	2.27	16,655	2
	20	1.75	14,335,236	1,964	2.11	94,163	13	2.07	72,322	10
	21	1.61	Ilimitadas	Ilimitadas	1.93	485,184	66	1.91	336,255	46
	22	1.47	Ilimitadas	Ilimitadas	1.77	5,202,474	713	1.77	3,838,973	526
	23				1.63	Ilimitadas	Ilimitadas	1.64	Ilimitadas	Ilimitadas
90	17	2.35	17,753	2	2.81	631	0	2.68	829	0
	18	2.11	94,163	13	2.54	4,420	1	2.44	4,800	1
	19	1.91	762,043	104	2.30	23,444	3	2.24	20,744	3
	20	1.74	14,335,236	1,964	2.10	124,351	17	2.06	78,153	11
	21	1.59	Ilimitadas	Ilimitadas	1.91	762,043	104	1.89	433,900	59
	22	1.46	Ilimitadas	Ilimitadas	1.75	14,335,236	1,964	1.75	6,737,028	923
	23				1.61	Ilimitadas	Ilimitadas	1.62	Ilimitadas	Ilimitadas
100	17	2.34	17,753	2	2.78	833	0	2.64	1,111	0
	18	2.10	124,351	17	2.51	5,837	1	2.44	4,800	1
	19	1.89	762,043	104	2.28	30,960	4	2.24	20,744	3
	20	1.72	Ilimitadas	Ilimitadas	2.08	124,351	17	2.01	118,701	16
	21	1.58	Ilimitadas	Ilimitadas	1.90	762,043	104	1.89	433,900	59
	22	1.45	Ilimitadas	Ilimitadas	1.74	14,335,236	1,964	1.75	6,737,028	923
	23				1.60	Ilimitadas	Ilimitadas	1.62	Ilimitadas	Ilimitadas

0004401 17OCT2017

Si se conoce el tránsito esperado de una vía, con los datos de la Tabla 2 se podría utilizar la teoría del daño acumulado para calcular el consumo total de fatiga [5] y así determinar el espesor de una placa-huella de las características analizadas para soportar este tránsito. Es importante anotar, que desde el punto de vista exclusivo de la fatiga, pavimentos de placa-huella en concreto simple podrían ser una solución para muchas vías de bajos volúmenes de tránsito en el territorio nacional, por las que circula un número reducido de camiones al día, sin embargo, el criterio de erosión también debe ser evaluado en este tipo de pavimentos.

3.3.2. Análisis del pavimento placa-huella por criterio de erosión

Una causa frecuente del deterioro de pavimentos de concreto es el bombeo, que consiste en la expulsión del material granular bajo la losa, generando pérdida de soporte la misma. La erosión ocurre debido a la acción combinada de la carga y la presencia de agua en el material de soporte, que genera la expulsión del material por las esquinas y juntas de las losas, generando vacíos que inducen escalonamiento y fisuración del pavimento [5]. La deflexión más crítica ocurre en la esquina de las losas bajo la acción de las cargas de tránsito [6]. A partir de mediciones hechas en el AASHO Road Test, la Portland Cement Association – PCA desarrolló la siguiente ecuación para estimar el número de repeticiones admisibles por erosión en pavimentos de concreto [8]:

$$log\, N = 14.524 - 6.777(C_1 P - 9.0)^{0.103} \qquad \text{Ecuación 4}$$

$$P = 268.7 \frac{p^2}{hk^{0.73}} \qquad \text{Ecuación 5}$$

$$Porcentaje\ de\ daño\ por\ erosión = 100 \sum_{i=1}^{m} \frac{C_2 n_i}{N_i} \qquad \text{Ecuación 6}$$

Donde,

P : Relación de trabajo o potencia

p : Presión en la interface losa-soporte en psi

h : Espesor de la losa en pulgadas

k : Módulo de reacción de la subrasante en pci

C_1 : Factor de ajuste (1 subbase no tratada, 0.9 subbase tratada)

C_2 : Factor de ajuste (0.06 sin bermas de concreto, 0.94 con bermas de concreto)

Para el análisis de erosión en las placas-huellas de concreto de 1.0 mt, se utilizó el modelo 2, la carga se colocó en la esquina de la placa central para calcular la deflexión de la losa, la

0004401 17OCT2017

Figura 12 muestra la posición del eje tándem, esta condición es la más crítica entre los ejes estudiados debido a que cada eje representa dos repeticiones de carga.

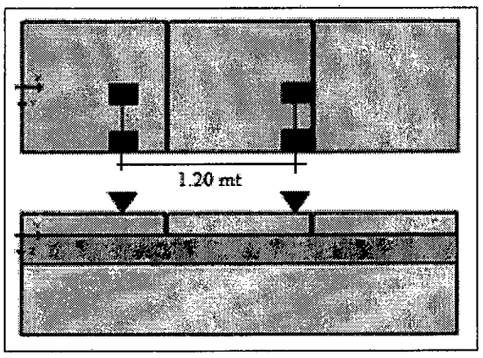


Figura 12. Evaluación de la deflexión de la esquina de la losa para cálculo de erosión

En la Tabla 3 se presentan los valores de erosión para un suelo con módulo resiliente de 100 MPa y diferentes espesores de placa, estos datos se presentan como ejemplo y soporte para posterior discusión. La tabla muestra que, a pesar de que el módulo de la subrasante tiene un valor aceptable, las repeticiones admisibles por erosión para el eje tándem son bastante bajas, no se encontraron mayores diferencias cuando se utilizan pasadores de carga en las juntas de la placa-huella, para subrasantes de menor calidad los resultados son más bajos.

Tabla 3. Análisis de erosión con placa huella de 1.0 mt y semieje tándem

Módulo de Subrasante (MPa)	Espesor Placa (Cm)	# Ejes tándem Admisibles
100	15	3
	16	4
	17	5
	18	6
	19	7
	20	8
	21	10
	22	11
	23	13

Los resultados no representan el comportamiento esperado para placas-huellas con base a las experiencias actuales en Colombia, esto plantea interrogantes sobre la aplicabilidad de este modelo de erosión para pavimentos de placa-huella. Cuando se desarrolló el método PCA se modelaron con elementos finitos losas de 4.57 mt de longitud y 3.65 mt de ancho

0004401 17OCT2017

[9], estas losas permiten mejor distribución del esfuerzo sobre la superficie de soporte de las placas-huellas de 1.0 mt de largo y 0.90 mt ancho analizadas, en consecuencia los esfuerzos en la interface placa-soporte son mayores en estas últimas, por lo que sé requiere una calibración del modelo para poder aplicarlo a las placas-huella. En la actualidad no existe un modelo para evaluar erosión en pavimentos de placas-huella, se requiere mayor investigación en este aspecto para poder considerar este criterio en el diseño de pavimentos con placa-huella.

Aunque el modelo de fatiga de la PCA es claramente aplicable (ecuación 1) para el caso de pavimentos en placa-huella, porque el modelo se desarrolló en el laboratorio con vigas de concreto, el análisis de fatiga que se realiza con el método de diseño de la PCA no es aplicable para definir espesores de placas-huella, dado que este considera el esfuerzo tensión equivalente, que es una reducción del esfuerzo máximo de tensión en el borde de la losa, considerando que sólo el 6% de los camiones circulan por el borde de la losa y que el esfuerzo disminuye a medida que la carga se aleja del borde [5], situación que es diferente al caso de pavimentos de placa-huella, en donde por su ancho angosto los vehículos se ven obligados a circular por el borde. En consecuencia, el método de diseño de pavimentos de concreto de la PCA, no es aplicable, tal y como está propuesto, para determinar espesores de pavimentos en placa-huella.

4. Conclusiones

Se realizó un análisis extensivo del comportamiento de los pavimentos en placa-huella, bajo las expectativas de carga que se tiene en Colombia para las vías de bajos volúmenes de tránsito. El análisis permitió aclarar dudas sobre el comportamiento de este tipo de pavimentos que se viene utilizando en el país.

El análisis con elementos finitos reveló que el esfuerzo máximo de tensión ocurre cuando la carga está en la posición centro-borde de la placa, el esfuerzo disminuye con el incremento del espesor de la placa, y con la disminución de la longitud de la placa. Dependiendo del tipo de eje y espesor de placa, la longitud de placa que no supere el módulo de rotura del concreto es variable, pero la falla por carga última bajo los ejes evaluados (SRS, SRD y Tándem) se puede controlar con la disminución de la longitud de la placa.

0004401 17OCT2017

El efecto más crítico del gradiente de temperatura, es incrementar los esfuerzos máximos de tensión en el borde inferior de la placa, este efecto también se puede minimizar disminuyendo la longitud de la placa, situación que es una ventaja dado que no existe mayor información sobre gradientes en losas de concreto en todo el territorio nacional.

Cuando se limita la longitud de la placa a 1.0 mt de largo con 0.9 mt de ancho, el análisis de fatiga revela que es posible diseñar pavimentos en palca-huella de concreto simple con las cargas estudiadas, sin embargo no es posible evaluar el comportamiento a erosión de estos pavimentos debido a que no existe un modelo adecuado.

Se encontró que el método de diseño de pavimentos de concreto de la Portland Cement Association – PCA, no es aplicable para la determinación de espesores de pavimentos en placa-huella en concreto, ya que sus procedimientos de análisis de fatiga y erosión están concebidos para losas de concreto con geometría distinta a las placas-huella de concreto, por lo cual varios de los criterios del método de la PCA, no son aplicables para los pavimentos en placa-huella.

Referencias

[1] Anonimo, Especificación 500-1P Placa-huella en concreto.

[2] Ministerio de Transporte, Límites de pesos y dimensiones de los vehículos de carga en Colombia, Resolución 004100 Ministerio de Transporte, Bogotá DC, 2004.

[3] National Cooperative Highway Research Program (NCHRP), Calibrated Mechanistic Structural Analysis Procedure for Pavement, Report 1-26, Transportation Research Board, National Research Council, Washington, DC, 1990.

[4] W. G. Davids, EverFE: Software for the 3D Finite Element Analysis of Jointed Plain Concrete Pavements, Online document retrieved on Feb 2 (2005), Maine, USA, 2005.

[5] R. G. Packard, Thickness Design for Concrete Highway and Street Pavements, Portland Cement Association, 1984.

[6] Y. H. Huang, Pavement Analysis and Design, Pearson/Prentice Hall, 2004.

[7] R. G. a. S. D. T. Packard, New PCA thickness design procedure for concrete highway and street pavements, The *Third International Conference on Concrete Pavement Design and Rehabilitation*, 1985.

0004401 17OCT2017

[8] R. a. T. S. Packard, Mechanistic design of concrete pavements to control joint faulting and subbase erosion, Portland Cement Association, 1983.

[9] L. Ying-Haur y S. . H. Carpenter, PCAWIN Program for Jointed Concrete Pavement Design, *Tamkang Journal of Science and Engineering,* vol. 4, nº 4, pp. 293-300, 2001.

[10] R. G. Packard, Thickness design for concrete highway and street pavements, *Portland Cement Assaciation,* 1984.

233

0004401 17OCT2017

ANEXO 3.

MEMORIA DE CÁLCULO ESTRUCTURAL DE PAVIMENTOS CON PLACA-HUELLA EN CONCRETO REFORZADO

Por

Juan Manuel Mosquera Rivera

Armando Orobio Quiñones

Juan Carlos Orobio Quiñones

Febrero 2016

0004401 17OCT2017

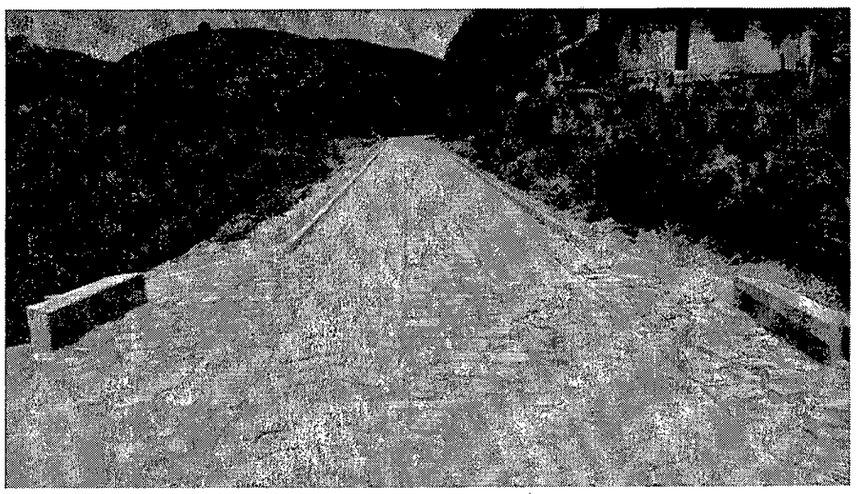
TABLA DE CONTENIDO

Introducción 3
1. Situación actual de la Placa-Huella en Colombia. 4
2. Descripción del modelo 5
3. Determinación de la carga aplicada a la placa-huella 6
3.1. Factores de mayoración de cargas 6
3.2. Vehículo de diseño 7
3.3. Carga por peso propio 8
4. Caracterización del soporte de la placa huella 9
5. Resultados de la evaluación del modelo del pavimentos en placa-huella 10
6. Comparación con la situación actual de la placa-huella en Colombia. 12
7. Conclusiones y recomendaciones 12
8. Referencias 13

0004401 17OCT2017

INTRODUCCIÓN

La Placa-huella es un sistema de pavimentación para vías de bajos volúmenes de tránsito, en el cual se pavimenta en concreto con refuerzo continuo únicamente la franja por la que circulan las ruedas de los vehículos (Fotografía 1). Las placas son conectadas entre sí con una riostra en concreto reforzado que une las dos placas y las berma cunetas, con el fin que estas funcionen monolíticamente. Los espacios entre las placas-huella, las riostra y las berma cunetas se rellenan con una capa de concreto ciclópeo del mismo espesor de la Placa-huella. Los pavimentos en placa-huella se consideran una alternativa económica para redes terciarias y secundarias con bajo volumen de tránsito.



Fotografía 1. Placa - Huella en concreto (Fuente: Alcaldía de Sibaté)

Debido a la creciente utilización de pavimentos en placa-huella en la red vial nacional en los últimos años, lo cual ha permitido mejorar la superficie de rodadura y reducir costos de mantenimiento de vías terciarias en muchas regiones del país, el Instituto Nacional de Vías contrató mediante concurso de méritos al Consorcio Manuales y Guías Ceal, conformado por las firmas El Alcarzár SAS, Compañía de Consultoria y Construcciones Ltda y Vias Alfa E.U., para la elaboración de una **Guía de Diseño de Pavimentos con Placa Huella.** Dentro de los requisitos contractuales se requiere un periodo de diseño de 20 años para los pavimentos en placa-huella y la estandarización de esta tecnología para un mejor uso en Colombia. En este artículo presentan los análisis realizados para el cálculo estructural de

los pavimentos en placa-huella y se suministran recomendaciones para la construcción de este tipo de pavimentos.

1. Situación actual de la Placa-Huella en Colombia.

A pesar del auge que actualmente tienen los pavimentos en placa-huella, que son construidos por la subdirección de red terciaria del Instituto Nacional de Vías - INVIAS, gobernaciones de departamentos y alcaldías municipales, actualmente no existe una guía de diseño y construcción para este tipo de pavimentos. La información más estructurada que se encuentra disponible es la especificación particular 500 – 1P [1] de la cual se desconoce su origen, no existe mayor información y al parecer no es una especificación oficial del INVIAS, sin embargo se ha venido utilizando en ausencia de una mejor especificación.

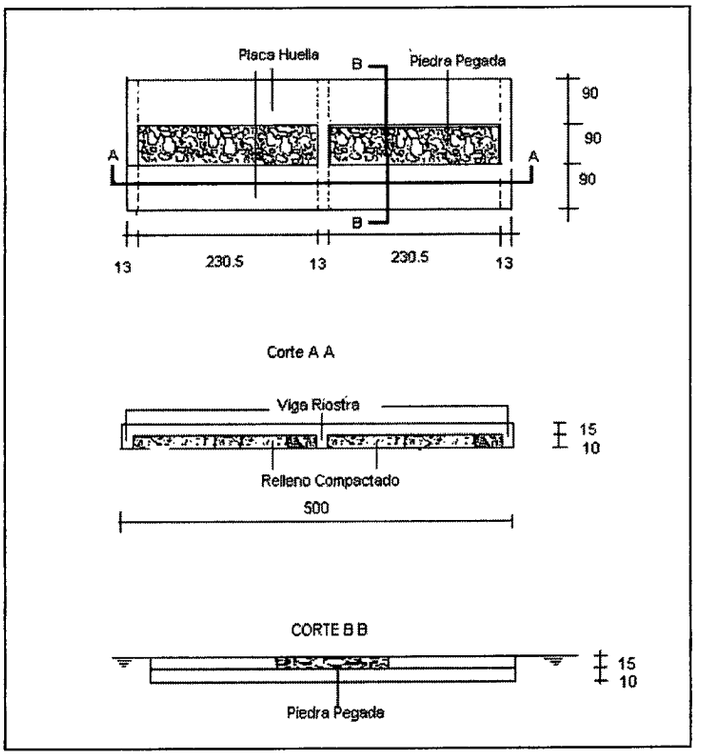


Figura 1. Geometría de Placa-huella de la especificación 500-1P

En la Figura1 se muestra la geometría de los pavimentos en placa-huella según la especificación 500-1P, el pavimento consiste en dos placas-huella paralelas en concreto reforzado. La figura muestra placas-huella en concreto reforzado de 0.90 mt de ancho y 5.0 mt de longitud, con riostras reforzadas en los extremos y en el centro de la longitud, con

sección de 0.13 mt x 0.25 mt. La placa-huella tiene un espesor de 0.15 mt y está apoyada sobre un material de afirmado de 0.10 mt de espesor que suministra un adecuado soporte a la placa-huella. El refuerzo está definido como una armadura de acero, en dos direcciones, con barras #2 (1/4") separadas cada 30 cm. Las riostras requieren dos aceros #3 (3/8") en la parte superior, la misma cuantía de refuerzo en la parte inferior y estribos de ¼" cada 20 cm.

Sin embargo, no se conocen memorias de cálculo, no se sabe con qué criterios de carga se llegó al diseño propuesto, ni cuáles fueron las condiciones geotécnicas consideradas para el soporte. Una gran duda es si con las características actuales, los pavimentos en placa-huella están en capacidad de tener un buen desempeño durante un periodo de 20 años, con las cargas vehiculares esperadas.

En la práctica, cuando se revisan proyectos construidos, se encuentran modificaciones a lo dispuesto en la especificación 500-1P, se incrementa el espesor de la placa-huella pero con las mismas cuantías de acero de refuerzo, se aumentan las dimensiones de las riostras, se varían los espesores de material de soporte, etc. Cambios del lado de la seguridad, seguramente debidos a la falta de información de los criterios que dieron origen al diseño presentado en la especificación 500-1P, pero que se hacen con poco rigor técnico-científico, debido a que no se analiza el comportamiento de la placas-huella con consideraciones de geometría, cargas de tránsito, capacidad de soporte del suelo y clima.

En la presente investigación se analizó el comportamiento de los pavimentos de placa-huella con losas continuamente reforzadas, el análisis se realiza mediante un modelo de elementos finitos para evaluar la respuesta de las placa-huella a las cargas criticas del tránsito, con diferentes calidades de apoyo para determinar la respuesta de las placas y proponer diseños que se ajusten a las condiciones de uso nacionales. Al final se realizan comparaciones con la especificación 500-1P y se hacen recomendaciones constructivas.

2. Descripción del modelo

Para efectos de poder determinar los esfuerzos y deformaciones que se presentan en cada uno de los elementos del pavimento en placa-huella se estructuró un modelo de elementos finitos de una Placa Huella con riostras separadas cada tres metros (Figura 2). El modelo consistió en 7 módulos de 3.0 mt cada uno, con el fin de representar la continuidad de la

0004401 17OCT2017

estructura, las cargas se ubicaron en el modulo central, el cual a su vez se dividió con diferentes nodos internos para poder determinar los esfuerzos máximos generados por el paso del vehículo de diseño. El modelo consideró que la placa huella se encuentra apoyada sobre una capa granular continua de soporte.

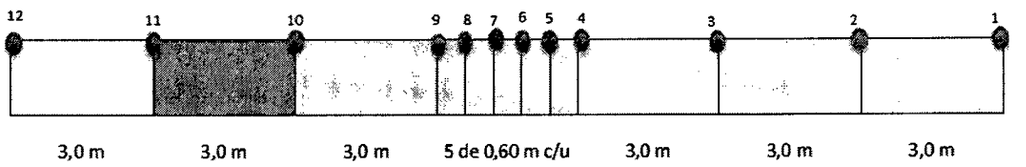


Figura 2. Geometría de Placa-huella de la especificación 500-1P

Los nodos del modelo se dividieron en tres tipos:

- Nodos externos (1, 2, 3, 10, 11 y 12) los cuales tienen como función representar la continuidad de la estructura.
- Nodos internos-externos (9, 4) que son los extremos del tramo cargado
- Nodos Internos (8, 7, 6 y 5) los cuales corresponden a puntos de ubicación de las cargas.

3. Determinación de la carga aplicada a la placa-huella

Con el fin de brindar un grado adecuado de confiabilidad al modelo planteado, las cargas fueron mayoradas para garantizar que los supuestos del modelo se cumplirán durante la fase de operación de la placa huella, teniendo en cuenta que las inversiones en pavimentación de vías son cuantiosas y que se trata de la elaboración de una guía de diseño de aplicación general, se considera que el grado de confiabilidad debe ser alto.

3.1. Factores de mayoración de cargas

Para obtener un grado de confiabilidad alto, la determinación de las cargas a considerar en el diseño de pavimentos con placa-huella debe minimizar las posibilidades de falla por incertidumbre en la estimación de cargas. Ante la poca información existente sobre factores de mayoración de cargas para el diseño de pavimentos reforzados, se toma la recomendación de Arango-Londoño [2], que recomienda la utilizacion de los siguientes factores de mayoración:

0004401 17OCT2017

- Factor de mayoración para carga muerta 1.50
- Factor de mayoración para carga viva 1.75

3.2. Vehículo de diseño

Los pavimentos en placa huella son utilizados para vías de bajos volúmenes de tránsito en vías de la red terciaria y secundaria. Los vehículos de mayor peso que se espera circule por este tipo de vias corresponden al camión C3, el cual tiene un eje simple de rueda simple adelante (SRS) y un eje tándem atrás (Figura 3). Los pesos máximos para estos ejes están regulados por la resolución 004100 del 2004 del Ministerio de Transporte [3], por lo cual se usa el peso máximo permitido para efecto de los análisis en el presente estudio. La distribución de cargas entre los lados del eje se consideró del 50%. En pavimentos de placa-huella cada una de las huellas soporta un lado del eje (semieje).

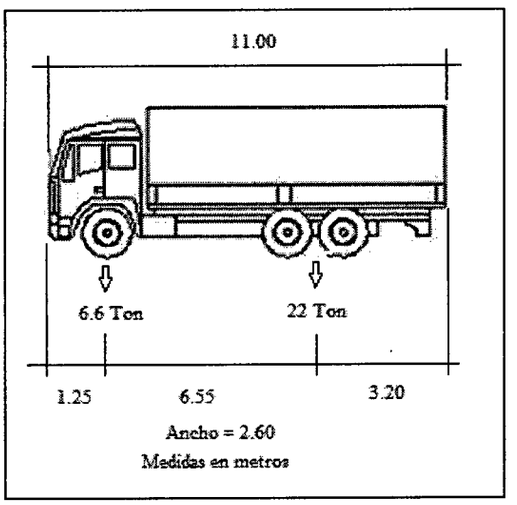


Figura 3. Pesos y dimensiones del vehículo de diseño – C3 (Mintransporte, 2004)

El camión C3 en su eje trasero tiene un eje tándem compuesto por dos ejes simples de rueda doble, separados 1,2 metros entre centros, con el fin de representar de manera más real la aplicación de esta carga, se considera una distribución uniforme entre las ruedas del semieje, como se muestra en la Figura 4.

Con el factor de mayoración de carga viva definido anteriormente, la carga viva a utilizar para cada rueda corresponde a 96.3 kN (9,63 Ton), para efecto de simplicidad se adoptó una carga de diseño 95 kN para cada rueda del semieje tándem.

000440 17OCT2017

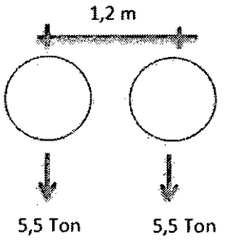


Figura 4. Distribución de carga en el semieje tándem del camión C3 (Fuente: Los Autores)

3.3. Carga por peso propio

Las cargas derivadas del peso propio corresponden únicamente al peso del concreto que conforma la placa-huella y la riostra, estas cargas se determinan a partir de la siguiente expresion:

Carga = Factos de mayoración * Volumen * Peso específico del concreto.

- **Determinación de la carga por peso propio de la riostra**

  Se considera un elemento cuadrado de 20 cm de ancho, 20 cm de alto y una longitud de 90 cm, correspondiente al ancho de la placa-huella. El peso propio mayorado de la riostra corresponde a 1,3 kN.

- **Determinación de la carga por peso propio de la placa-huella**

  Para la carga por peso propio de la placa-huella varía dependiendo de la ubicación de la losa y el tipo de nodo que le corresponda dado que la longitud de placa que contribuye al peso que soportará cada nodo varía de la siguiente manera:.

  - **Nodos externos**

    La longitud de placa corresponde a 3.0 metros y su peso propio mayorado es de 14,6 kN.

  - **Nodos internos-externos**

    La longitud de placa corresponde a 1,5 metros y su peso propio mayorado es de 7,3 kN.

0004401 17OCT2017

- **Nodos internos**

  La longitud de placa corresponde a 0,60 metros y su peso propio mayorado es de 2,90 kN

4. Caracterización del soporte de la placa huella

De acuerdo con la experiencia existente en la construcción de los pavimentos en Placa-huella reforzada, se considera que estos pavimentos tienen una superficie de soporte conformada por una capa de material granular de subbase apoyada sobre la subrasante, esta capa brinda un apoyo uniforme a la placa permitiendo la disminución de esfuerzos y deformaciones.

Para efectos de determinar la calidad del apoyo se empleó la siguiente correlación del CBR con el módulo de reacción de la subrasante (ecuación 1) [4]. Con base en la ecuación 1 y las correlaciones de la PCA [5] entre el módulo resiliente y módulo de reacción de la subrasante se construyó la Tabla 1.

$$M_R = 1500(CBR) \qquad \text{Ecuación 1}$$

Donde,

M_R: Módulo resiliente de la subrasante en psi

CBR: Capacidad de soporte de la subrasante

Tabla 1 Correlación entre el módulo de reacción de la subrasante y el CBR del suelo

CBR	Mr [PSI]	K [PCI]	K [kN/m^3]
3	4,500	100	27,130
4	6,000	132	35,812
5	7,500	143	38,796
6	9,000	152	41,238
7	10,500	161	43,679
8	12,000	178	48,291
9	13,500	193	52,361
10	15,000	200	54,260

El aporte de la capa granular se estableció a partir de la correlación recomendada por la PCA mostrada en la Tabla 2, que considera el efecto sobre el módulo de reacción de una subbase sin tratar colocada sobre la subrasante [5].

0004401 17OCT2017

Tabla 2. Módulo de reacción del conjunto Subrasante - Subbase [kN/m^3] (modificada de Huaung, 2004 [6])

K subrasante [kN/m^3]	Espesor de subbase en (m)			
	0.10	0.15	0.22	0.30
13,565	17,635	20,348	23,061	29,843
27,130	35,269	37,982	43,408	51,547
54,260	59,686	62,399	73,251	86,816
81,390	86,816	89,529	100,381	116,659

De acuerdo a lo anterior para una subrasante con un CBR de 3.0 y una subbase granular de 0.15 mt, el módulo de reacción del conjunto subrasante-subbase corresponde a 37,982 kN/m^3.

5. Resultados de la evaluación del modelo del pavimentos en placa-huella

Con el fin determinar los momentos de la placa-huella para evaluar los requerimientos del acero de refuerzo se evaluó el modelo de elementos finitos con los siguientes parámetros:

- Ancho de banda: 0.90 mt (ancho de la Placa-huella)
- Módulo de elasticidad del concreto $2.1 * 10^6$ kN/m^2
- Módulo de reacción del soporte 37,982 kN/m^3
- Momento de inercia del cimiento $2.53125 * 10^{-4}$

En las Figuras 5 y 6 se presentan las deformaciones y momentos de la placa-huella resultantes de las cargas aplicadas por el paso de un camion C3 y el peso propio del pavimento en placa-huella.

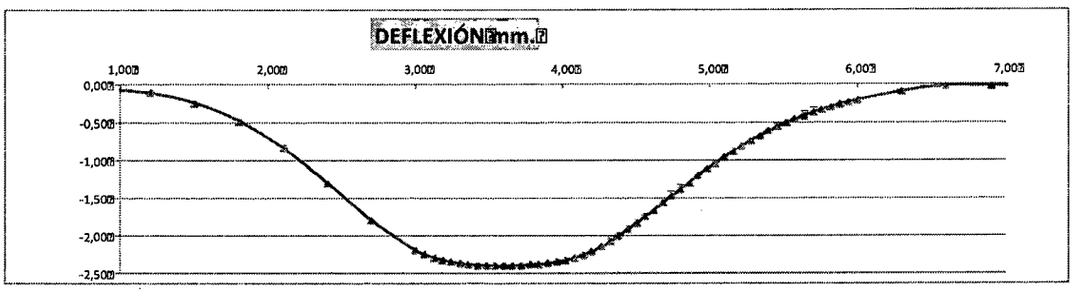


Figura 5. Deflexiones en la Placa Huella

La Figura 6 muestra que el momento máximo que se presenta en la placa huella corresponde a 18.4 kN-m. Una placa huella de 0.15 mt de espesor con un refuerzo centrado de una barra corrugada # 4 cada 15 cm, tiene una capacidad por momento de 20.5 kN-m. En consecuencia, este es el refuerzo recomendado debido a que la capacidad supera

levemente el momento calculado. Adicionalmente, una separación de 15 cm suministra una adecuada distribución de esfuerzos a lo ancho de la placa-huella.

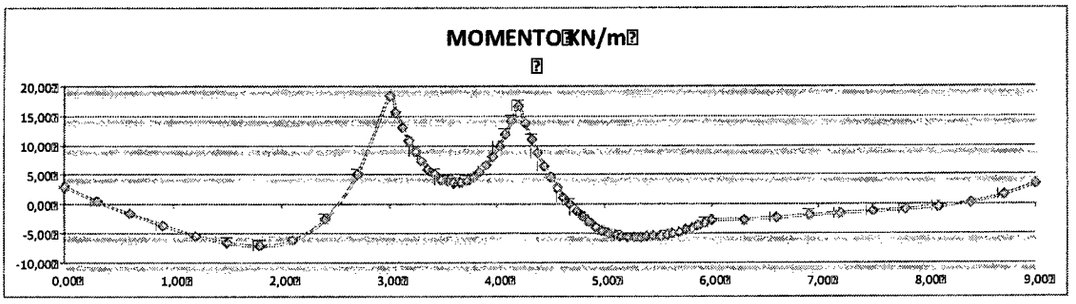


Figura 6. Momentos en la placa-huella

En el caso de elementos de concreto reforzado, con elementos de concreto que están en interacción con el suelo, se recomienda un recubrimiento mínimo de 7.5 cm. Un espesor de 0.15 mt para los pavimentos en placa-huella es el espesor mínimo aceptable que garantiza el recubrimiento mínimo, colocando el refuerzo en el eje central longitudinal, lo que permite contribuir a absorber los momentos negativos y positivos que se presentan en la placa.

Con el fin de fijar el acero de refuerzo longitudinal se recomienda la colocación de acero transversal con barras # 2 cada 30 centímetros, con el propósito fijar el acero longitudinal, evitar desplazamientos durante la construcción y permitir una mejor distribución de esfuerzos transversalmente.

En caso de requerirse placas-huellas con ancho superior a los 90 cm, por ejemplo en los sobreanchos de la curvas, se debe conservar el mismo acero de refuerzo, con igual distribución que en las placa-huellas de 0.90 mt de ancho. Las berma-cunetas por ser elementos que pueden estar sometidos a las mismas cargas que la placa-huella deberán tener un refuerzo similar al de estas.

La riostras son elementos cuya función es confinar la subbase y garantizar que las placas huellas trabajen monoliticamente, las mismas están sometidas a esfuerzos bajos, por lo que se recomienda la colocación de la cuantía mínima de refuerzo para estos elementos que corresponde a 4 barras #4 longitudinalmente (dos arriba y dos abajo) y estribos #2 cada 15 centímetros.

0004401 17OCT2017

6. Comparación con la situación actual de la placa-huella en Colombia.

La comparación directa entre la estructura recomendada por la especificación 500-1P y la recomendada en el presente estudio no puede realizarse con exactitud debido a que no se conocen los parámetros de diseño tenidos en cuenta para el cálculo de la estructura de la especificación 500-1P, no se conoce el vehículo de diseño, ni la capacidad de soporte de la subrasante, parámetros determinantes en la capacidad estructural del pavimento propuesto. Al comparar la geometría y los requerimientos de acero de refuerzo de ambas estructuras, se encuentra que son menores las requeridas por la especificación 500-1P, esto hace presumir que el vehículo de diseño pudo ser inferior al vehículo C3, generando gran incertidumbre ante el requerimiento actual de que el pavimento soporte este tipo de vehículo.

7. Conclusiones y recomendaciones

Los análisis se realizaron con superficie de apoyo con un módulo de reacción del conjunto de 37,982 kN/m^3, que corresponde a una subrasante con CBR de 3.0 y una subbase granular de 0.15 mt de espesor. Durante el proceso constructivo se debe garantizar el cumplimiento de estas condiciones mínimas, las cuales deben mantenerse durante el periodo de servicio del pavimento para garantizar la durabilidad del mismo. Tanto la subrasante como la subbase deben ser debidamente compactadas. Se debe garantizar el confinamiento de la subbase por parte de la riostra y el bordillo, por lo que estos elementos deberán proyectarse por debajo de la placa, como mínimo hasta alcanzar una profundidad igual al espesor de la subbase (15 cm).

El efecto de una mejora en la calidad del soporte de la placa-huella representa una leve disminución en los esfuerzos, deformaciones y momentos que se presenta en los pavimentos de placa-huella reforzada, se recomienda que esta diminución de esfuerzos se considere un factor de seguridad y no se reduzcan las cuantías del refuerzo.

Las cuantías de refuerzo propuestas son muy cercanas a la cuantía mínima requerida por el pavimento. La reducción la cuantía de refuerzo implicaría un incremento en el espaciamiento de las barras #4, dado que con barras #3 la estructura no podría resistir las solicitaciones de la carga de diseño utilizada en el análisis, esto no sería conveniente porque se afectaría la distribución de esfuerzos a lo ancho de la placa-huella.

0004401 17OCT2017

Las juntas de construcción de la placa-huella deben hacerse a un tercio de la longitud de la misma, medido desde la riostra y en ese punto se permite traslapo de máximo el 50% del refuerzo longitudinal. La Junta de construcción de la riostra debe hacerse a 30 cm del punto donde termina la placa-huella, en este punto se permite traslapo de máximo el 50% del acero longitudinal.

8. Referencias

[1] Anonimo, Especificación 500-1P Placa-huella en concreto.

[2] J. F. Arango-Londoño, Diseño de pavimentos reforzados: evaluación de factores de carga y subresistencia por el método LRFD, *Tecno Lógicas,* nº 14, pp. 89-103, 2005.

[3] Ministerio de Transporte, Límites de pesos y dimensiones de los vehículos de carga en Colombia, Resolución 004100 Ministerio de Transporte, Bogotá DC, 2004.

[4] W. a. A. K. Heukelom, Dynamic testing as a means of controlling pavements during and after construction,» *International conference on the structural design of asphalt pavements,* vol. 203, nº 1, pp. 667-685, 1962.

[5] R. G. Packard, Thickness design for concrete highway and street pavements, *Portland Cement Association,* 1984.

[6] Y. H. Huang, Pavement Analysis and Design, Pearson/Prentice Hall, 2004.