

**XIV SIMPOSIO COLOMBIANO SOBRE INGENIERÍA DE PAVIMENTOS**  
**Popayán, junio 11 a 14 de 2003**

**COLAPSO DEL PAVIMENTO RÍGIDO DE LA CALLE 91L SUR DE BOGOTÁ D.C.**

**Lisandro Beltrán Moreno**

Profesor Emérito Universidad Nacional de Colombia

**Neimar Arley Castaño Peláez**

Ingeniero del Convenio IDU-UN

**Jorge Matiz Pereira**

Profesor Asociado Universidad Nacional de Colombia

**RESUMEN**

El Instituto de Desarrollo Urbano de Bogotá. IDU, le solicitó a la Universidad Nacional de Colombia, U.N., determinar las causas de la falla precoz del pavimento en hormigón que se construyó en la Calle 91L Sur, Barrio Aurora de Bogotá D.C., entre la Avenida a Usme y la Autopista al Llano.

El proyecto de rehabilitación de la Calle 91L Sur consistió en la construcción de un pavimento rígido de una longitud de 747.7 m, con un ancho variable entre 8 y 9.5 m, de una vía bidireccional. Las obras se iniciaron en abril de 2000 y concluyeron en noviembre del mismo año. En el mes de marzo de 2001 el pavimento ya presentaba agrietamientos, y en enero de 2003 su deterioro era muy avanzado, con roturas de numerosas losas, presencia de escalonamiento de los fragmentos, y bombeo de los finos del material de base.

De acuerdo con el diseño, la estructura del pavimento debió conformarse con losas de 24 cm de espesor, con hormigón de  $MR = 43 \text{ kgf/cm}^2$ , apoyadas sobre una base granular de 15 cm. Durante la construcción se decidió utilizar hormigón de  $MR = 50 \text{ kgf/cm}^2$  y disminuir el espesor de las losas a 20 cm.

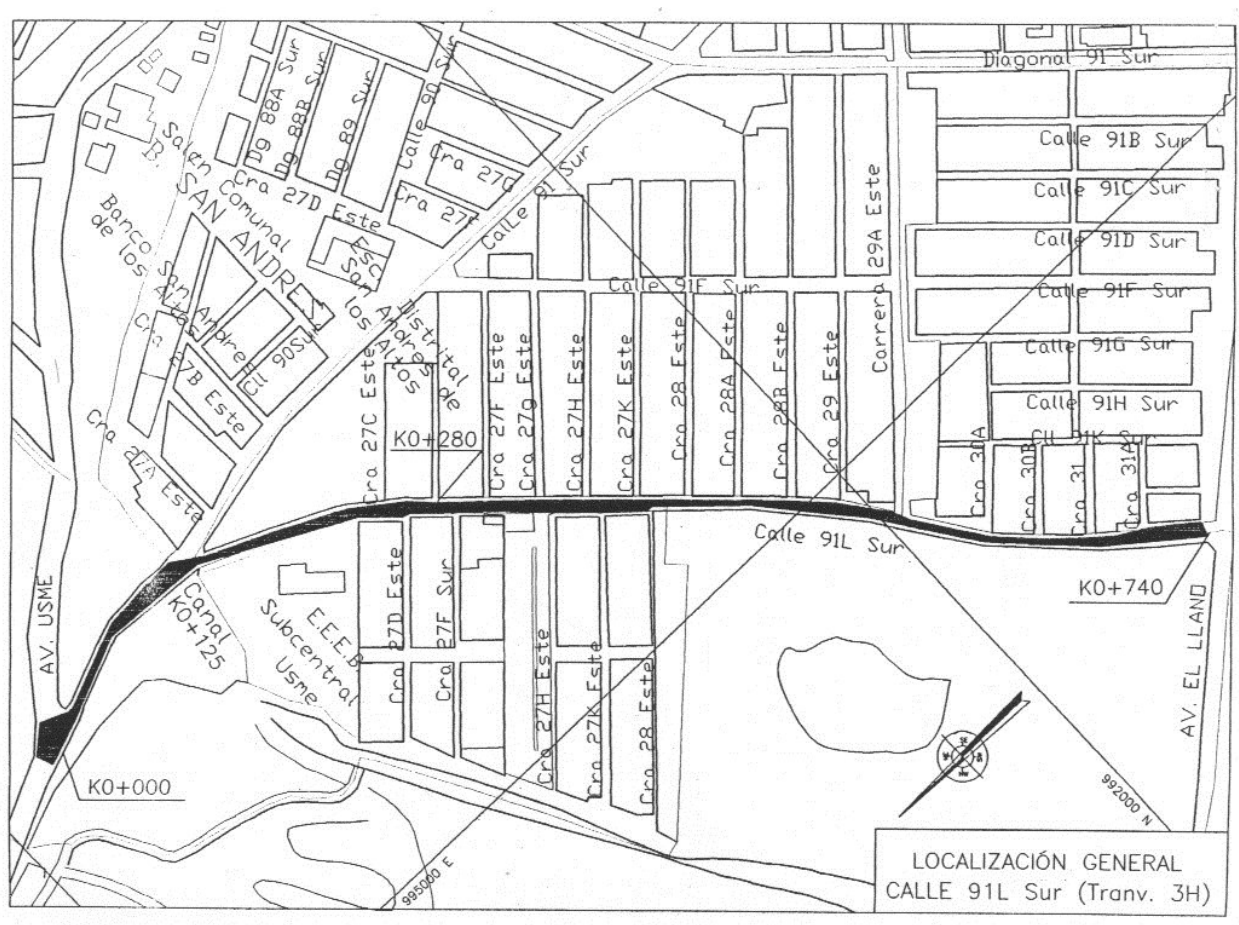
El estudio de la U.N. concluyó que la causa principal de la falla precoz del pavimento fue el tránsito durante cerca de cuatro meses de volquetas marca Volvo, modelos A20 y A25C, las cuales transportaron materiales de desecho desde la Estación Terminal de Usme del sistema Transmilenio hasta la escombrera La Perdigona. Dichas volquetas aplican cargas por eje superiores a las máximas establecidas por las resoluciones pertinentes del Ministerio de Transporte.

Entre las causas contribuyentes de la falla del pavimento se halla la estructura débil que se colocó, debido a deficiencias del método de diseño utilizado y a que el número de ejes equivalentes se subestimó. Además, el módulo de rotura del hormigón de las losas tuvo

valores inferiores al supuesto en el momento en que el pavimento empezó a recibir el tráfico, se colocó un material de base que no cumplió con las especificaciones de diseño, se construyeron losas con modulaciones inadecuadas, las juntas en los pozos y sumideros fueron defectuosas y las losas circundantes no se reforzaron, la compactación del material de relleno de una tubería de gas natural fue muy baja, no se colocaron pasadores en la junta longitudinal, y los sellos de la junta losa/sardinel se perdieron.

## 1. INTRODUCCIÓN

El Instituto de Desarrollo Urbano, IDU, contrató el diseño y la reconstrucción de la Calle 91L Sur, que está localizada en el sector sur oriental de la ciudad de Bogotá D.C., localidad de Usme. La longitud de la vía es de 747.7 metros, con un ancho variable entre 8 y 9.5 metros, y dos carriles de circulación en ambos sentidos. En la Figura 1 se aprecia la localización de la vía.



**Figura 1.** Localización de la Calle 91L Sur.

Inicialmente la estructura del pavimento aprobada consistió en una losa de 24 cm en concreto de MR 43 Kg/cm<sup>2</sup>, y 15 cm de base granular. Sin embargo, teniendo en cuenta

las características del tráfico que soportaba esta vía, la Interventoría y el IDU aprobaron aumentar el módulo de resistencia del concreto a MR=50 Kg/cm<sup>2</sup> y disminuir el espesor de la losa a 20 cm, con los mismos 15 cm de base granular.

El día 6 de Abril del 2000, se autorizó por parte del IDU el inicio de los trabajos para la rehabilitación de la Calle 91L Sur, y una vez aprobado el plan de manejo de tráfico se empezaron los trabajos de la rehabilitación el día 12 de abril del 2000, en la primera etapa comprendida entre la Cra. 27H Este hasta la Autopista al Llano, la cual se dio al servicio el día 19 de julio del 2000. Ese mismo día, se iniciaron los trabajos de rehabilitación en la segunda etapa, comprendida entre la Cra. 27 H y la Avenida Usme, la que se dio al servicio en la primera semana del mes de noviembre del mismo año.

## 2 DIAGNÓSTICO DE PATOLOGÍAS

La U. N. inició la realización de la inspección visual el 28 de junio del 2001, y la evolución más reciente la efectuó en enero de 2001. Las principales clases de daños son los siguientes:

- Losas de concreto con agrietamientos entre medios y severos, que en la mayoría de los casos superan anchos de grieta de 10 mm, acompañados de diferencias de nivel en cada uno de los bordes (escalonamientos), y en algunas losas se observa colapso total.
- Sellos de juntas defectuosos en toda la extensión de la vía, y en muchos puntos se observó material granular fino sobre las losas de concreto (bombeo).
- Fracturamiento y hundimiento de las losas de concreto localizadas sobre la tubería de alcantarillado, ocasionados por inadecuada compactación del material de base y deficiencia en la modulación de las losas de concreto en zonas de pozos de redes de servicios públicos.

## 3. DISEÑO DE LA ESTRUCTURA DEL PAVIMENTO

En marzo del 2000 el Contratista presentó al IDU el “Estudio de suelos y evaluación del pavimento”, en el que se consideraron las alternativas de pavimentos flexible y rígido. En la Tabla 1 se incluyen los factores de diseño que se adoptaron en dicho estudio.

Tabla 1. Factores de diseño adoptados por el Contratista

FACTOR DE DISEÑO	VALOR
NEE tramo 1	7.8 millones
NEE tramo 2	6.6 millones
MR (kg/cm <sup>2</sup> )	41, 45, y, 50
Módulo dinámico subrasante (kg/cm <sup>2</sup> )	504
Módulo reacción subrasante, k (psi/in)	140
Módulo elástico base, Eb (psi)	25000

Espesor de la base, Hb (cm)	15
Coef. fricción losa/base, f	1.4
Módulo elástico de la losa, E <sub>c</sub> (psi)	3'500.000
Velocidad media anual del viento (km/hr)	9.6
Temperatura media anual del aire (°C)	13.9
Precipitación media anual (mm)	1778

NEE = número de ejes equivalentes en el período de diseño de 15 años

Tramo 1: Av. Usme a Cl. 91

Tramo 2: Cl. 91 a Av. al Llano

En la alternativa de pavimento rígido se consideraron las tres opciones que se aprecian en la Tabla 2, para diferentes valores del módulo de rotura del hormigón, MR, y con un NEE de 7.8 millones. El diseño se realizó por el método de la AASHTO (1998).

**Tabla 2. Opciones de pavimento rígido**

<b>OPCIÓN</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>3</b>
MR ((kg/cm <sup>2</sup> ))	41	45	50
Espesor losa (cm)	24.7	23.0	21.1
Espesor base granular tipo C (cm)	15.2	15.2	15.2

De estas opciones se escogió la 3 para construir el pavimento, es decir, con espesores de losa de 20 cm y 15 cm de subbase. En la Tabla 3 se incluyen algunas de las recomendaciones del diseñador para la construcción del pavimento rígido.

**Tabla 3. Recomendaciones para construcción del pavimento rígido**

<b>ELEMENTO</b>	<b>RECOMENDACIÓN</b>
Losa de concreto de cemento Portland	Sección 33, ETC – IDU
Base granular tipo C	Sección 14, ETC – IDU
Modulación de juntas	Máximo 1.25 (largo/ancho)
Longitud de losas	Máximo 4 m
Pasadores	Diámetro de ¾", espaciamiento de 30 cm, f <sub>y</sub> = 2800 kg/cm <sup>2</sup> (60000 psi)
Juntas de construcción	Barras de refuerzo corrugadas en el eje neutro. Utilizar aditivos epóxicos.
Base granular	Desgaste M.A.: < 35% LL: < 25 % IP: < 3 % CBR: > 80 %

ETC = Especificaciones Técnicas de Construcción del IDU.

#### **4. HIPÓTESIS DE CAUSAS DE LAS FALLAS**

Luego de efectuar la inspección de daños y revisar los documentos relacionados con, el contrato de obra, el diseño, la construcción, y la interventoría, que el IDU suministró a la

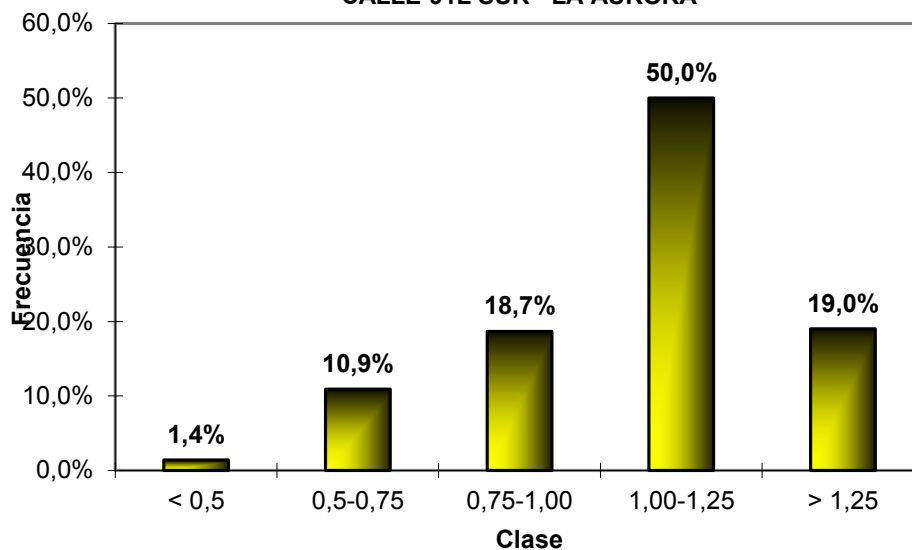
U.N., se plantearon las siguientes hipótesis sobre la falla del pavimento que se analizaron posteriormente en el estudio.

- Resistencias de las mezclas de concreto menores que las definidas en el diseño, detectadas durante la ejecución de la obra.
- Deficiencias en el estudio de tránsito, que no consideró las componentes de tránsito atraído, generado, desviado y desarrollado.
- El tránsito atraído de vehículos de carga no previsto en los estudios y diseños, en especial el de las volquetas Volvo A20 y A25, las cuales se utilizaron para transportar los sobrantes de las excavaciones de la Terminal de Transmilenio de Usme, situada en la Calle 66 Sur.
- Modulación incorrecta de las losas del pavimento rígido, con relaciones de esbeltez superiores a las recomendadas por la AASHTO, y distancias entre juntas de 5 a 7 m, cuya distancia máxima debió ser de 4.9 metros. Estas longitudes hacen que el esfuerzo en el centro de la losa supere la resistencia a flexo tracción del concreto, con la falla consecuente.
- La remodelación de losas de concreto realizada por el Contratista, mediante el corte de una junta transversal en la mitad de la placa, de acuerdo con recomendaciones de ASOCRETO. Esta remodelación no incluyó la colocación de pasadores en la nueva junta. En la Figura 1 se aprecia el histograma de modulación de las losas luego de efectuar la reparación mencionada.
- Baja calidad en los materiales granulares, con granulometrías por fuera de los rangos especificados, alto contenido de finos, índice de plasticidad y límite líquido por fuera de los rangos permitidos, bajo porcentajes de equivalente de arena.
- Falta de soporte de las losas de concreto, ocasionada por deficiencias en la compactación del material granular de subbase, y en la modulación de las losas de concreto en los sumideros y pozos de redes de servicios públicos.

## **5. CONCEPTO DE LA SOCIEDAD COLOMBIANA DE INGENIEROS**

Por solicitud del IDU la Sociedad Colombiana de Ingenieros, SCI, presentó en noviembre de 2002 el “Concepto técnico sobre los diseños y tráfico que ha soportado y soporta la vía, del tramo de la Calle 91L (Tv. 3H) entre la Avenida Usme y la Autopista Al Llano”. Este concepto realizó un inventario de fallas del pavimento, evaluó las condiciones del tránsito de vehículos por la vía, calculó los espesores de la estructura del pavimento, revisó los conceptos presentados previamente sobre la falla del pavimento, y planteó recomendaciones y conclusiones. A continuación se hace un resumen de los aspectos más importantes del estudio.

**FIGURA 2. HISTOGRAMA DE LA REMODULACIÓN (L/W) DE LAS  
LOSAS  
CALLE 91L SUR - LA AURORA**



### 5.1 Inventario de fallas

La SCI efectuó un inventario de las fallas que presentaba el pavimento en octubre de 2002, cuyos principales resultados se incluyen en la Tabla 4.

**Tabla 4. Inventario de fallas realizado por la SCI (octubre 2002)**

FALLA	ÁREA (m <sup>2</sup> )	PORCENTAJE
Área total pavimento	6273.8	100
Área afectada	5217.7	83
Asentamientos	1012.0	16
Colapso total	705.0	11

### 5.2 Estudio de tránsito

La SCI también elaboró un estudio de tránsito con base en conteos sobre la vía realizados en dos estaciones, en períodos de 12 horas, que extendió a 24 horas mediante correlación con una estación maestra próxima a la vía en cuestión. En la Tabla 5 se incluyen los factores considerados y los valores del NEE estimados.

**Tabla 5. Resultados del estudio de tránsito de la SCI**

FACTOR/ESTACIÓN	No. 1 (Cl. 91)	No. 2 (Av. Al Llano)
TPDS	8391	1672
Factor Camión	1.044	1.69
Tasa crecimiento (2002-2005) (%)	26.8	26.8

Tasa crecimiento (2005-2014) (%)	2.8	2.8
NEE	26'066380	18'675918

### 5.3 Diseño del pavimento

La SCI verificó el diseño de la estructura del pavimento que se construyó, con los mismos parámetros de diseño que utilizó el Contratista. Para hacerlo utilizó el programa de computador AASHTO 2000, que desarrolla las ecuaciones que propone el método AASHTO (1998). La SCI encontró que el espesor estimado por el Contratista para las losas es correcto, de 21.1 cm para el NEE estimado en la Estación No. 1 de aforo del tránsito, y de 20.5 cm para el correspondiente de la Estación No. 2.

La SCI además estimó el espesor de las losas requeridas por tres valores del NEE calculados para la Estación No. 1, con base en las estimaciones del NEE de su propio estudio de tránsito. En la Tabla 6 se pueden apreciar los espesores de losas estimados.

Tabla 6. **Espesores de losa requeridos según la SCI**

<b>NEE</b>	26.1 millones	25.2 millones	24.1 millones
<b>ESPESOR (cm)</b>	25.7	25.6	25.4

Con la aproximación al entero mayor, el espesor de losa requerido por las cargas del tráfico es de 26 cm. Como conclusión la SCI indica que el espesor de losa que se construyó (20 cm) es inferior en 6 cm al espesor que las condiciones del tráfico estimado requieren.

### 5.4 Impacto de volquetas “fuera de carretera” en la vida del pavimento rígido

Sobre el probable daño que produjeron las volquetas marca Volvo, que transportaron materiales de desecho desde la estación terminal del sistema Transmilenio hasta el botadero La Perdigona, la SCI hizo los siguientes planteamientos:

- a) Los daños observados son de carácter puntual y no sucedieron sobre todas las vías utilizadas para el transporte de los materiales. Si las volquetas producen un efecto de daño destructivo, éste se apreciaría en toda la longitud de la vía.
- b) Si bien el tráfico de las volquetas Volvo “fuera de carretera” afectó la vida útil del pavimento, y pudo producir fracturamientos puntuales en puntos críticos, no fue la causa única del deterioro generalizado que presenta hoy la vía.

### 5.5 Análisis de informes previos

ASOCRETO (2001) presentó un informe sobre las deficiencias del pavimento. La SCI manifestó su acuerdo con las afirmaciones de ASOCRETO sobre las fallas en la modulación de las losas, en cuanto a las relaciones longitud/ancho mayores que las máximas recomendadas, el espaciamiento entre juntas transversales mayores que la

máxima indicada en el diseño, el volumen estimado de tráfico menor que el real, y la modulación inadecuada de las losas en los pozos y sumideros.

Gutiérrez (2001) elaboró un concepto sobre la fallas del pavimento, en calidad de especialista del Contratista. La SCI indicó su desacuerdo con el concepto que considera como causa determinante de las fallas del pavimento, el tránsito de las volquetas marca Volvo denominadas “fuera de carretera”.

La U.N. (2001) presentó el 3 de diciembre un informe al IDU sobre la rotura prematura del pavimento, sobre el que la SCI manifestó su acuerdo con las conclusiones.

## **5.6 Conclusiones de la SCI**

La SCI presentó las siguientes conclusiones principales en su informe:

- a) La patología que presenta el pavimento de concreto de la Calle 91L Sur tiene numerosas causas cuya combinación condujo al estado actual de completo deterioro.
- b) Uno de los factores que incidió en el deterioro del pavimento fue el tráfico de las volquetas “fuera de carretera”.
- c) La responsabilidad sobre el estado de deterioro del pavimento está en las tres partes que intervinieron en la ejecución de la obra: el Contratista, la Interventoría, y el IDU.

## **6. CONCEPTO DEL ING. CARLOS IVÁN GUTIÉRREZ GUEVARA**

Por solicitud del IDU, el Ing. Carlos Iván Gutiérrez Guevara adelantó un estudio complementario de oficina a partir e información secundaria, acerca de las fallas del pavimento rígido de la Calle 91 L Sur. Este informe se entregó al IDU el 8 de enero de 2003 (Gutiérrez, 2003). A continuación se resumen sus principales conceptos y resultados.

### **6.1 Análisis de tránsito**

Gutiérrez (2003) compara las estimaciones del tránsito realizadas por el Contratista y la SCI y hace las siguientes observaciones:

- a) El incremento del tránsito producido entre la ejecución de los estudios de tránsito del Contratista y el de la SCI es cercano al 70%. Lo justifica en parte por el cierre de la Av. Usme.
- b) Los factores de daño empleados por el Contratista son los determinados por la Universidad del Cauca para las vías nacionales.



c) Los vehículos alimentadores de Transmilenio, que circulan por la vía, corresponden al 50% de los vehículos pesados que transitan por ella, los cuales no fueron considerados en el estudio del Contratista.

d) La probable subestimación del tránsito no se puede considerar como causa de la falla precoz que presentó el pavimento.

## **6.2 Modulación de losas**

Gutiérrez (2003) señala que la distribución de las losas es sumamente irregular, con losas de diferentes anchos y longitudes y relaciones longitud/ancho. Sobre los efectos de dicha modulación comenta lo siguiente:

a) Existe un efecto importante de la presencia de losas con agujeros de pozos y sumideros en los cuales se presenta rotura y hundimientos. Hay 41 losas (12.4%) con estos problemas.

b) Las longitudes de losas son variables, entre 3 m y 6 m. En la tecnología internacional actual se considera que 5 m es la longitud máxima. La práctica actual en Bogotá recomienda longitudes máximas de 4.5 m.

c) La relación longitud/ancho máxima que se recomienda es 1.25. En el pavimento de la Cl. 91L hay varias losas que exceden esta relación.

## **6.3 Materiales y rellenos inapropiados en la fundación**

Sobre este aspecto Gutiérrez (2003) comenta lo siguiente:

a) En la falla del pavimento “se ha puesto en evidencia la presencia de una tubería, la cual fue colocada previamente a la construcción por contratistas de Gas Natural, de acuerdo con la información suministrada por el contratista, cuyo relleno ha sufrido asentamientos mayores que los del material de subrasante, lo cual permite deducir que tuvo una pobre compactación.”

b) “El efecto de tal heterogeneidad en la fundación indudablemente favoreció la falla de la estructura de pavimento al introducir esfuerzos adicionales ante la aplicación de las cargas del tránsito pesado.”

## **6.4 Efecto de las cargas pesadas del tránsito**

Sobre este efecto se destacan las siguientes afirmaciones de Gutiérrez (2003) :

a) Las volquetas tipo C3 y los Dumpers Volvo tienen cargas muy superiores a la máxima legal establecida por las Resoluciones 2501/02 y 13791/88 del Ministerio de Transporte.

- b) La carga máxima legal para un vehículo tipo C3, al cual se asimilan las Dumpers Volvo, es de 28 tf. La A20 tiene una carga de trabajo de 34.5 tf, 40.3 tf en la A25C, y 34.5 tf en la Mack SS58.
- c) El número de ejes equivalentes aplicado sobre el pavimento entre los meses de diciembre/2000 a marzo/2001 lo estima en 499.140, que corresponde a 6.4% del tránsito total de diseño estimado para el período de diseño.
- d) En junio de 2002 el pavimento de la Cl. 91L Sur presentaba un índice de serviciabilidad de 3.8. “El deterioro posterior ha sido muy acelerado como consecuencia del bombeo ocurrido a través de las grietas de las losas y el asentamiento de fragmentos.”
- e) El método de diseño de pavimentos rígidos de la AASHTO no se puede aplicar para explicar la falla del pavimento de la Calle 91L Sur.
- f) Para estudiar la influencia de las cargas sobre los esfuerzos en las losas de concreto, efectuó el análisis con la rutina Winslab del programa ILLISLAB, y con el programa KENSLABS. Consideró el efecto del tren trasero de las volquetas Volvo A25C y A20 para la condición de “carga de borde de la losa, que resulta ser la más crítica.”
- g) Como resultado del estudio de la modulación de las losas se concluye que para longitudes hasta de 5 m el incremento de esfuerzos no es teóricamente importante.
- h) Los esfuerzos que produce la volqueta Mack SS44 son menores que los de la Volvo A20.
- i) Para considerar el consumo de fatiga y erosión utilizó la metodología de la Portland Cement Association (PCA), con el tránsito reportado para los cuatro meses por el Contratista. El análisis obtuvo “un consumo de fatiga mayor del 100%, lo cual refleja la causa de la falla por agrietamiento precoz.
- j) Con el programa KENSLABS, la ley de fatiga de la PCA, la aplicación de 100 cargas por día del eje trasero de cada tipo de volquetas, y una losa de 5 m de longitud, encontró los días hasta la falla que se presentan en la Tabla 7.

**Tabla 7.** Días hasta la falla del pavimento por paso de volquetas

<b>Volqueta</b>	<b>Días hasta la falla</b>
Volvo A25C	26
Volvo A20	197
Mack SS-44	7701

- k) El pavimento flexible de la Avenida Boyacá, en el tramo por donde circularon las volquetas Volvo, no llega a la falla con el tránsito ocurrido, pero su vida útil se redujo sensiblemente con el paso de dichos vehículos.

## 6.5 Conclusiones

Gutiérrez (2003) llega a las siguientes conclusiones:

a) (...) la causa de la falla precoz del pavimento de la Calle 91L Sur está asociada con la ocurrencia de un tránsito muy intenso y pesado durante la etapa de construcción y la Estación de Transmilenio de Usme y, de manera muy especial, el tránsito de dumpers Volvo, el cual superó ampliamente todas las expectativas de diseño y construcción.”

b) “La vía en cuestión presenta defectos constructivos y problemas de heterogeneidad de subrasante que pudieron apresurar algunos días la falla ante el tránsito especial de las volquetas pero que, en condiciones normales de tránsito, no habrían provocado la falla precoz que ocurrió. De hecho, aún en zonas en donde no se evidencian problemas constructivos se dio la situación de falla temprana.”

## 7. ENSAYOS REALIZADOS POR LA INTERVENTORÍA

La interventoría de la construcción del pavimento relacionó los ensayos de control realizados en su Informe Final (Asesoría, Consultoría e Interventoría Ltda., ACI., 2000). En ellos se aprecia una buena cantidad de ensayos de resistencia a la flexión sobre muestras del hormigón que se empleó en la construcción de las losas, pero sobre el material granular de la base son muy escasos.

### 7.1 Resistencia a la flexión

Los ensayos se realizaron sobre vigas normalizadas, pero algunas con edades diferentes a los 28 días. Para determinar el valor promedio del módulo de rotura fue necesario proyectar su valor a dicha edad, con los factores encontrados por Corredor y Vargas (1988). En la Tabla 8 se incluyen los resultados obtenidos, y en la Figura 2 se presenta el histograma de la distribución de los resultados de la resistencia a la flexión.

**Tabla 8.** Resistencia a la flexión de ensayos de control de la Interventoría

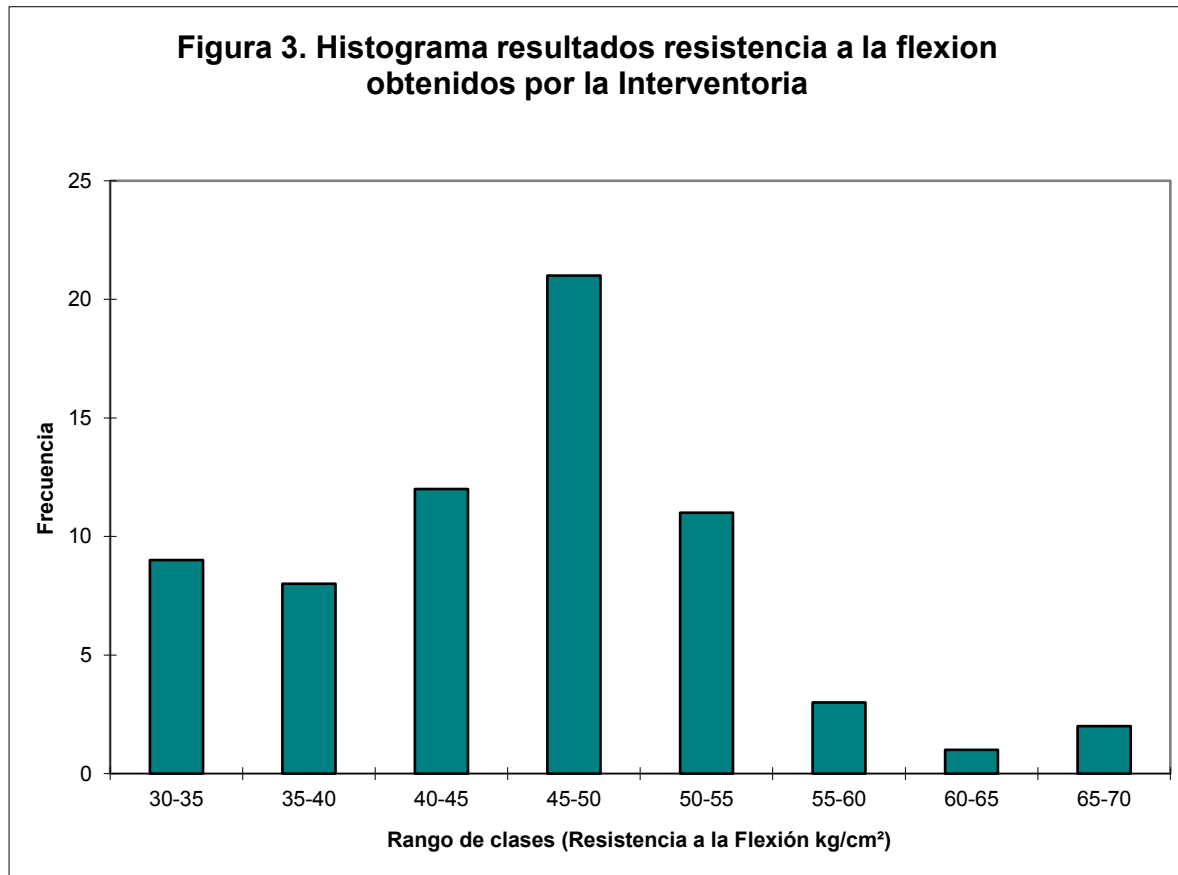
<i>Resistencia a la flexión kg/cm<sup>2</sup> (Valores Proyectados) *</i>	
Media	45.58
Error típico	0.98
Mediana	46.58
Moda	53.03
Desviación estándar	8.03
Varianza de la muestra	64.53
Curtosis	0.29
Coefficiente de asimetría	0.26
Rango	37.90

Mínimo	30.31
Máximo	68.20
Número Total de Datos	67

La resistencia a la flexión, o módulo de rotura del concreto de las losas presentó un valor promedio de 45.6 kgf/cm<sup>2</sup> a los 28 días, pero con un porcentaje importante de valores inferiores a dicho valor promedio.

## 7.2 Ensayos de densidad en el terreno

Los ensayos de densidad en el terreno que efectuó la Interventoría determinaron numerosos puntos con porcentajes de compactación menores que 95% de la máxima densidad alcanzada con el ensayo Proctor modificado, pero se supone que todos ellos obligaron a recompactar el material de base granular y que las densidades finales cumplieron con la especificación.



## 8. ENSAYOS REALIZADOS POR LA U.N.

Con el propósito de conocer el estado en enero de 2003 de la estructura del pavimento se excavaron ocho apiques, espaciados una distancia cercana a los 100 m. Los puntos que se seleccionaron para excavar los apiques tuvieron en cuenta que el pavimento se hallara en buen estado, con el fin de analizar la estructura tal como fue construida, sin las

alteraciones y pérdidas de material que han ocurrido en los sitios donde hoy se aprecia la destrucción total del pavimento.

El trabajo de campo y los ensayos de laboratorio fueron realizados por la firma SUELOS Y PAVIMENTOS GREGORIO ROJAS Y CIA LTDA., bajo la supervisión y control de los ingenieros del Convenio IDU-UN.

Los apiques se excavaron hasta una profundidad promedio de 1.5 m con respecto a la superficie de las losas, y en ellos se estableció la disposición de las capas, se tomaron muestras para ejecutar pruebas de CBR inalterado de la capa de subrasante, se realizaron ensayos de cono penetrómetro dinámico (PDC) para estimar el valor de CBR de la subrasante, y se efectuaron densidades en el terreno. De las losas de hormigón y las capas granulares se tomaron muestras inalteradas y alteradas para ejecutar ensayos de laboratorio.

### 8.1 Espesores de las capas de la estructura del pavimento

En la Tabla 9 se presentan los espesores de las capas que conforman la estructura del pavimento, que se hallaron en cada uno de los apiques.

**Tabla 9.** Espesores de las capas del pavimento (cm)

<b>APIQUE</b>	<b>LOSA</b>	<b>BASE GRANULAR</b>	<b>SUBBASE</b>
1	20.2	37.8	-
2	24	56	-
3	19.5	60.5	80
4	21	39	-
5	22.5	37.5	130
6	19.5	20.5	40
7	20	25	15
8	20	37	38
PROMEDIO	20.8	39.2	

De los resultados mostrados en la Tabla 9 se concluye que el espesor promedio de la losa de hormigón construida es el indicado por el diseño

### 8.2 Ensayos en el hormigón de las losas

Para determinar la calidad del hormigón utilizado en la construcción de las losas se tomaron fragmentos de ellas, de las cuales se extrajeron en el laboratorio núcleos de 10 cm de diámetro para hallar la resistencia a la compresión, y se cortaron las vigas de dimensiones normalizadas para efectuar ensayos de resistencia a la flexión. En la Tabla 10 se presentan los resultados que se obtuvieron con dichos ensayos.

**Tabla 10.** Resultados de ensayos de resistencia del hormigón

RESISTENCIA APIQUE	COMPRESIÓN (kgf/cm <sup>2</sup> )	MÓDULO ROTURA (kgf/cm <sup>2</sup> )
1	524	49
2	527	53
3	550	50
4	517	49
5	603	62
6	581	55
7	410	57
8	547	56
PROMEDIO	532	53.8
INICIO SERVICIO (90%)	479	48.5

De acuerdo con concepto del Ing. GABRIEL GÓMEZ, para el tipo de hormigón empleado en la construcción de las losas se estima que la ganancia en resistencia desde el momento en que el pavimento se puso en servicio hasta la ejecución de las pruebas de la U.N. es del 10%. Por lo tanto, el módulo de rotura del hormigón en el momento en que se dio al servicio, tenía un valor cercano al obtenido con los ensayos de control de la Interventoría de obra, que fue de 45.6 kgf/cm<sup>2</sup>.

### 8.3 Ensayos en las capas granulares

Sobre las muestras de las capas granulares se realizaron ensayos de clasificación, análisis granulométrico y límites de Atterberg, desgaste en la máquina de Los Ángeles, y equivalente de arena. En la Tabla 11 se presentan los resultados de los ensayos de índices de consistencia y de equivalente de arena, que la U.N. encontró en las muestras del material de base granular, y también los límites establecidos por las normas de construcción.

**Tabla 11.** Ensayos de índices de consistencia y equivalente de arena

APIQUE	LL			IP			EQ. ARENA			PASA 200		
	UN	BG	SB	UN	BG	SB	UN	BG	SB	UN	BG	SB
1	22	<25	<30	6	<3	<6	8	>30	>25	28	<15	<20
2	24			8			8			35		
3	19			2			8			21		
4	24			10			9			53		
5	23			6			9			27		
6	23			6			9			27		
7	25			8			7			30		
8	24			7			7			29		

Como se puede apreciar, el material que se colocó como base granular cumple el requisito del LL, tanto para capa de base y subbase que indican las especificaciones de diseño y construcción, no cumple el del índice de plasticidad para base, y en tres casos

el correspondiente para las subbases. En el caso del ensayo de arena, no cumple en ningún caso la especificación del INV (1998). Tampoco la cumple en el caso del porcentaje de finos, el material que pasa por la malla 200.

#### 8.4 Ensayos en el material de subrasante

Con el fin de obtener la capacidad de soporte del material de subrasante se efectuaron ensayos de CBR inalterado y de penetrómetro dinámico de cono (PDC). En la Tabla 12 se incluyen los resultados que se obtuvieron.

**Tabla 12. Resultados de ensayos sobre material de subrasante**

APIQUE	CBR INALT.	PDC
1	4.8	10.3
2	4.8	
4	4.1	
7		18.7
8	3.4	7.6
PROMEDIO	4.3	

El valor promedio del CBR de la subrasante que se obtuvo con los ensayos inalterados, luego de inmersión, es de 4.3, el cual se considera es el valor de diseño. Un valor similar fue utilizado por el diseñador.

### 9. ESTUDIOS DE TRÁNSITO

En relación con los estudios de tránsito desarrollados por el Contratista, el cual empleó para diseñar la estructura del pavimento, y el que elaboró la SCI para emitir su concepto, la U.N. hace los siguientes comentarios:

- El estudio de la SCI emprende un nuevo estudio de tránsito cuyos resultados fueron confrontados con los obtenidos por el Contratista.
- Los dos estudios parten de los resultados de aforos en dos puntos de la vía y a partir de allí se realizan las proyecciones, utilizando tasas de crecimiento. Ninguno de los dos hace un análisis de asignación de tránsito a una red que involucre las condiciones tanto actuales como futuras de sus componentes.
- Al haber estado la vía en cuestión afectada por cierres o desvíos efectuados en otras vías, los aforos como punto de partida para la estimación del tránsito futuro son cuestionados, tal como se hace en el informe del Ing. Gutiérrez: “para la fecha de los conteos (16 a 20 de septiembre de 2002) se encontraba parcialmente cerrada la vía a Usme...”
- La utilización de la estación maestra de la Cl. 56 Sur por parte del estudio de la SCI requiere considerar previamente su composición vehicular y el comportamiento de los volúmenes de tránsito, con el fin de conocer hasta qué punto su patrón es consistente con el obtenido sobre la vía en estudio.

- Las tasas de crecimiento del tránsito utilizadas en cada uno de los estudios están sin sustentar. La de la población de la ciudad, utilizada por el Contratista es demasiado general para un caso particular, como es el caso de la Calle 91L Sur, y la escogida por la SCI, con base en el estudio para la Avenida Caracas y Avenida Guacamayas, exige una validación, teniendo en cuenta el carácter diferente de las vías que la soportan. Así mismo, el paso drástico de un valor de 26.8% a 2.8 exige una explicación.
- El estudio de la SCI no sustenta las anotaciones que hace descalificando el estudio del Contratista. Así, considera que no es cierto que el volumen de autos sea cero entre las 11:00 pm y 6:00 am, pero la SCI tampoco realizó aforos en este período; habla de una subvaloración de la tasa de crecimiento del 2.2 pero tampoco justifica el valor de 2.8 escogido por la SCI; critica la no consideración del tránsito atraído o, generado, pero tampoco hace la estimación de estos en su estudio.
- Si bien las anteriores anotaciones no avalan los resultados del Contratista, al estudio de la SCI, igualmente, le falta rigor lo que lo invalida para descalificar al primero. De todas maneras, sí puede anotarse que los dos presentan fallas en la forma como se abordó la estimación de los flujos vehiculares que sirvieron de base para el diseño de la estructura de pavimento.

## **10. ANÁLISIS DEL EFECTO DE LAS CARGAS**

El análisis del efecto de las cargas de los vehículos se realizó con las fórmulas de tipo cerrado derivadas de los modelos de Westergaard (citado por Huang, 1993), y con el programa KENSLABS, que fue desarrollado por Huang (1993). A continuación se presentan los resultados que se encontraron.

### **10.1 Con fórmulas de tipo cerrado**

Estas fórmulas son válidas para una sola losa de longitud infinita soportada por una fundación líquida, y sobre la que se aplica carga con una rueda sencilla colocada en tres posiciones: a) en una esquina; b) en el interior de la losa, a una distancia considerable de cualquier borde; c) en el borde, lejos de cualquier esquina.

A pesar de sus limitaciones con respecto al modelo real, se pueden utilizar estas fórmulas para estimar de manera aproximada los esfuerzos en la losa en los casos de aplicación de carga de las volquetas Volvo A20 y A25C, y un camión C3, considerando el eje trasero tandem como dos ejes sencillos. Para lograr la fácil utilización de éstas fórmulas se elaboró el programa de computador ADPRP1V.BAS, en el que además se incluyó el análisis de daño con los factores que propusieron Darter y Barenberg (1977), citados por Huang (1993).

### **10.2 Análisis de daño**

Con el fin de estimar el consumo de fatiga que produjeron las volquetas Volvo cuando circularon sobre la vía, se calculó su número de pasadas. Para ello se consideraron los



volúmenes de excavaciones de las obras de la Estación y los Patios del Portal de Usme, que se transportaron sobre el pavimento de la Calle 91L Sur.

Puesto que los materiales excavados se llevaron a dos escombreras, Canta Rana y La Perdigona, se supuso que el 50% del volumen total del material transitó por la Calle 91L Sur. Por otra parte, por informaciones obtenidas de la firma que efectuó el transporte de los materiales excavados, en la operación se utilizaron tres volquetas Volvo A20 y dos volquetas Volvo A25C. En la Tabla 13 se presentan los valores considerados para estimar el número de pasadas de cada volqueta por el pavimento de la Calle 91L Sur.

**Tabla 13.** Número estimado de pasadas de las volquetas Volvo

Volumen total de excavaciones (m <sup>3</sup> )	401956
Volumen excavado para La Perdigona (m <sup>3</sup> )	200978
Factor de expansión del material excavado	1.33
Volumen transportado a La Perdigona (m <sup>3</sup> )	267300
Número pasadas de volqueta A20	16954
Número pasadas de volqueta A25C	11302

### 10.3 Especificaciones de las volquetas Volvo

También por información directa del contratista que realizó el transporte de los materiales excavados, se obtuvieron las especificaciones y presiones de inflado de las llantas que emplean las volquetas Volvo, las cuales se incluyen en la Tabla 14.

**Tabla 14.** Especificaciones de las llantas de las volquetas Volvo

MODELO	A20	A25C
Tipo en eje delantero	Goodyear 18.0 R25	Goodyear 23.5 R25
Tipo en eje trasero	Goodyear 20.5 R25	Goodyear 23.5 R25
Presión inflado eje delantero (psi)	34.8	54.5
Presión de inflado eje trasero (psi)	43.5	54.5

### 10.4 Resultados del análisis con el programa ADPRP1V

Con base en los datos de las Tablas 13 y 14 y las condiciones de carga impuestas por las volquetas Volvo A20 y A25C, y el camión C3 con las cargas máximas del Ministerio de Transporte, se corrió el programa ADPRP1V. En la Tabla 15 se presentan los esfuerzos calculados para las cargas del eje trasero en la esquina, en el borde, en la junta, y en la mitad de la losa según la fórmula que indica la AASHTO (1998).

**Tabla 15.** Esfuerzos producidos por el eje trasero de diferentes volquetas (KN/m<sup>2</sup>)

VOLQUETA	A20	A25C	C3
Esquina	1779	2236	1860
Borde	2643	3323	2728
Junta	3291	4138	3363
Interior AASHTO	2259	2845	1187

$$MR = 50 \text{ kgf/cm}^2 = 4903 \text{ KN/m}^2$$

De los resultados presentados en la Tabla 15 se concluye que la condición de carga más crítica es la de carga en la junta, seguida por la de borde. La condición de carga de la volqueta A25C es la que alcanza el mayor valor del esfuerzo interior recomendado por la AASHTO (1998).

En la Tabla 16 se incluyen los días estimados para que ocurra la falla por el paso de los vehículos considerados, suponiendo 100 pasadas por día, y en la Tabla 17 los consumos de fatiga estimados para el número total de pasadas calculado para cada volqueta.

**Tabla 16.** Días para la falla con 100 pasadas por día

VOLQUETA	A20	A25C	C3
Borde	45546	164	23800
Junta	215	0.2	126
Interior AASHTO	1'073544	8748	7408 millones

**Tabla 17.** Consumos de fatiga para número estimado de pasadas (%)

VOLQUETA	A20	A25C	C3
Número pasadas	16954	11302	16954
Borde	0.37	68.7	0.71
Junta	78.8	57847	135
Interior AASHTO	0.015	1.3	2.3E-6

## 10.5 Resultado del análisis con el programa Kenslabs

Por solicitud del IDU, la U.N. realizó la validación y/o verificación de los análisis esfuerzo – deformación que efectuó Gutiérrez (2003) con el programa de elementos finitos Kenslabs, el cual fue desarrollado por Huang (1993) para los pavimentos rígidos. Cabe advertir que para validar la información del programa Kenslabs se adoptaron todas las variables iniciales supuestas por Gutiérrez (2003), que fueron las siguientes:

- a. Se realizó un análisis de sensibilidad para diferentes longitudes de losa (desde 3.0 m hasta 6.0 m, variando la longitud cada 0.5 m), mientras que el ancho de la losa se mantuvo constante, 3.6 m. El modelo se debió correr con anchos mayores de losa, ya que en la vía se encontraron losas con anchos mayores que 3.6 m., pues el ancho útil de la Calle 91 L Sur está entre 8.5 m y 9.0 m.
- b. Se tomaron 100 pasos diarios de las volquetas Volvo A20 y A25 y 250 para las volquetas dobletroque.
- c. La presión de inflado de las volquetas Volvo utilizada en el modelo fue de 60 psi y de los dobletroques 75 psi. De acuerdo con las hojas ruta de las volquetas Volvo, la

presión de inflado de las llantas traseras de la A20 es de 43.5 psi, y de 54.5 psi en las A25.

- d. El módulo de rotura de las losas de concreto es de 50 kg/cm<sup>2</sup>. (714 psi).
- e. Espesor losa de concreto de 8 pgd.
- f. Espesor base granular de 6 pgd.
- g. Se modelaron grupos de carga ubicados en la esquina de la losa.
- h. Cada modelación se realizó para un solo grupo de carga. En ningún momento se realizó combinación de grupos de carga.
- i. En la modelación se tuvo en cuenta la existencia de barras de transferencia de carga o pasadores.

En las Tablas 18 y 19 se presentan el cuadro resumen de los datos de entrada de la modelación inicial y los resultados que encontró Gutiérrez (2003) con el programa Kenslabs.

**Tabla 18.** Datos de entrada de la modelación Inicial

<b>Tipo de vehículo</b>	<b>VOLVO A20</b>	<b>VOLVO A25</b>	<b>DOBLETROQUE</b>
No pasadas /día	100	100	250
Presión de Inflado (psi)	60	60	75
Módulo de rotura (psi)	714	714	714
Espesor de losa (pgd)	8	8	8
Espesor de base granular (pgd)	6	6	6

**Tabla 19.** Resultados de la modelación

<b>L(m)</b>	<b>VOLQUETAS VOLVO A20</b>		<b>VOLQUETAS VOLVO A25</b>		<b>DOBLETROQUE</b>
	<b>σ máx (psi)</b>	<b>Diseño (días)</b>	<b>σ máx (psi)</b>	<b>Diseño (días)</b>	
3.00	419.35	197	470.12	20	337.39
3.50	413.63	185	463.62	26	339.26
4.00	407.38	240	456.39	35	340.06
4.50	416.00	167	468.53	22	339.29
5.00	411.75	197	463.67	26	338.16
5.50	413.34	185	467.76	22	330.85
6.00	406.68	240	462.33	28	305.47

Los resultados de los esfuerzos de flexión originados por el paso de las volquetas Volvo estimados por Gutiérrez (2003) se compararon con los modelos corridos por la U.N. En

la Tabla 20 se presenta la comparación de cada uno de los modelos realizados dentro del estudio de patologías de la Calle 91 L Sur.

**Tabla 20.** Comparación de esfuerzos máximos calculados por la U.N. y Gutiérrez (2003) – Caso de cargas en la Esquina.

Tipo de Volqueta	VOLQUETAS VOLVO A20		VOLQUETAS VOLVO A25	
	$\sigma$ máx (psi) U.N.	$\sigma$ máx (psi) Gutiérrez (2003)	$\sigma$ máx (psi) U.N.	$\sigma$ máx (psi) Gutiérrez (2003)
Longitud de la losa (m)				
3.00	472.21	419.35	523.10	470.12
4.00	469.28	407.38	518.30	456.39
5.00	490.35	411.00	-	-
6.00	500.24	406.68	542.00	462.33

De acuerdo con los valores presentados en la Tabla 20, los cálculos de la U.N. validan los resultados desarrollados por Gutiérrez (2003). Las pequeñas diferencias encontradas en los esfuerzos máximos se deben a los modos nodales de convergencia del programa Kenslabs.

La U.N. utilizó 36 modelos adicionales para realizar diferentes análisis de sensibilidad, y apreciar el efecto de la variación de los módulos de rotura y el espesor de losa. Los modelos para el análisis de sensibilidad consideraron las siguientes variables de entrada:

Módulos de rotura ( $\text{kg}/\text{cm}^2$ ): 45, 48 y 50

Espesor losa de concreto (cm): 21, 22, 23, 24, 25, 26, 27

En la Tabla 21 se presenta el análisis de sensibilidad, que se efectuó para 16954 pasos de volquetas volvo A20, y 11302 pasos de las volquetas Volvo A25. En la Figura 4 se presenta la comparación gráfica de los análisis de resultados de la Tabla 21.

**Tabla 21.** Análisis de sensibilidad con resultados del programa Kenslabs.

VOLQUETAS VOLVO A20 PLACA DE 5 m DE LONGITUD									
MR (Kg/cm <sup>2</sup> )	45			48			50		
MR (psi)	642,9			685,7			714,3		
Espesor (in)	$\sigma$ máx. (psi)	Vida útil (años)	Vida útil (días)	$\sigma$ máx. (psi)	Vida útil (años)	Vida útil (días)	$\sigma$ máx. (psi)	Vida útil (años)	Vida útil (días)
8,27	490,66	0,01	3,7	490,46	0,02	7,3	490,46	0,05	18,3
9,06	441,82	0,05	18,3	441,53	0,18	65,7	441,53	0,37	135,1
9,45	420,26	0,14	51,1	420,26	0,42	153,3	420,26	0,84	306,6
9,84	400,65	0,32	116,8	400,65	0,94	343,1	400,65	1,39	507,4

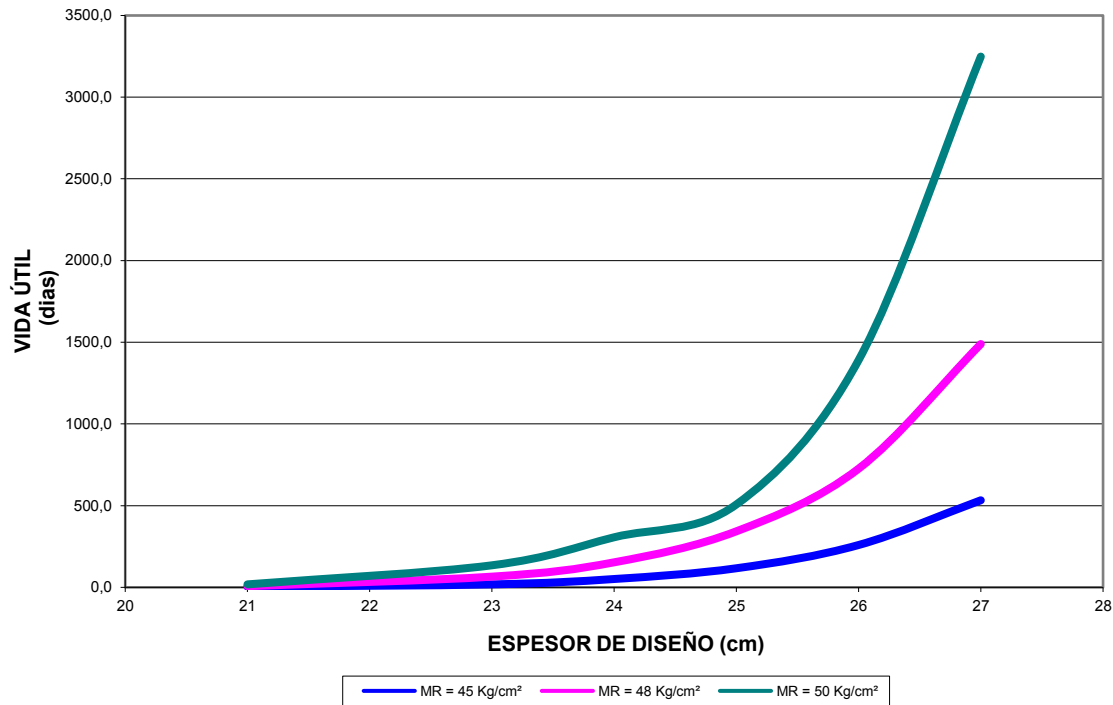
10,24	382,09	0,71	259,2	382,09	1,99	726,4	382,09	3,81	1390,7
10,63	365,33	1,46	532,9	365,39	4,08	1489,2	365,33	8,9	3248,5

VOLQUETAS A25 PLACA DE 5 m DE LONGITUD									
MR (Kg/cm <sup>2</sup> )	45			48			50		
MR (psi)	642,9			685,7			714,3		
Espesor (in)	$\sigma$ máx. (psi)	Vida útil (años)	Vida útil (días)	$\sigma$ máx. (psi)	Vida útil (años)	Vida útil (días)	$\sigma$ máx. (psi)	Vida útil (años)	Vida útil (días)
8,66	516,19	0	0,0	516,19	0,01	3,7	516,19	0,03	11,0
9,06	489,32	0,01	3,7	489,32	0,04	14,6	489,32	0,09	32,9
9,45	465,23	0,03	11,0	465,23	0,1	36,5	462,29	0,24	87,6
9,84	443,03	0,08	29,2	443,03	0,25	91,3	443,03	0,52	189,8
10,24	421,99	0,19	69,4	421,99	0,59	215,4	421,99	1,17	427,1
10,63	403,03	0,43	157,0	403,03	1,28	467,2	403,03	2,45	894,3

De la Tabla 21 se aprecia que con el paso de las volquetas Volvo la falla del pavimento rígido se acelera totalmente. Cabe advertir que para el caso de MR50 y espesor de 20 cm, el esfuerzo máximo de flexión es de 518 kg/cm<sup>2</sup> y 576 kg/cm<sup>2</sup>, para las A20 y A25 respectivamente. Con los esfuerzos anteriormente citados la vida útil del pavimento es de 73 días para el caso de las Volvo A20, y 3.65 días para las Volvo A25. Con estos resultados se explica la falla prematura del pavimento.

Para el caso del diseño de la SCI (MR50 y espesor de losa de 26 cm), la falla se produciría a los 3.81 años (1390.7 días) y 1.17 años (427.1 días) para las volquetas A20 y A25 respectivamente. Cabe advertir que el concepto de la SCI, en ningún momento tuvo en cuenta el paso de este tipo de volquetas.

**FIGURA 4. ANÁLISIS DE SENSIBILIDAD - VARIACIÓN DEL ESPESOR DE LA LOSA (VOLQUETA VOLVO A20)**



## 11. CONCLUSIONES

1. La causa detonante de la falla precoz del pavimento rígido que se construyó en la Calle 91L Sur fue el paso de las volquetas Volvo A20 y A25C, que produjeron esfuerzos de tracción en el hormigón próximos a su resistencia.
2. Existen causas contribuyentes que propiciaron la falla precoz del pavimento rígido de la Calle 91L Sur, las cuales condujeron a tener un pavimento débil para resistir las cargas del tráfico. Ellas son:
  - a. Tráfico subestimado de los vehículos que circulan por la vía, según el estudio que adelantó la Sociedad Colombiana de Ingenieros. El espesor de la losa de hormigón debió ser mayor que 0.2 m.
  - b. El factor de daño, o factor camión fue subestimado porque la mayoría de los camiones que circulan por la Calle 91L Sur transportan materiales de construcción. El factor que se utilizó en el diseño es el encontrado en las vías nacionales.
  - c. Modulación incorrecta de algunas losas, por relaciones longitud/ancho mayores que 1.25, y por juntas inadecuadas en losas con pozos y sumideros. Éstas últimas debieron reforzarse con acero.

- d. Materiales de baja calidad en la capa de base, por excesivo porcentaje de finos y su alta plasticidad. Estas condiciones han propiciado el fenómeno de bombeo.
- e. Juntas transversales de losas sin pasadores, pues algunas de las que presentaban una relación longitud/ancho mayores que 1.25 se cortaron y se conformó una nueva junta transversal, de acuerdo con recomendaciones de ASOCRETO. En éstas nuevas juntas no se colocaron los pasadores que transfieren la carga a las losas vecinas, y que hacen que la carga de borde y de junta no sea crítica.
- f. Junta longitudinal sin pasadores, que hacen que los esfuerzos de junta y de borde sean críticos, cuando durante la circulación de vehículos éstos tienen que cambiar de carril al encontrar otros parqueados contra el andén. Esta condición es crítica aún para los camiones tipo C3.
- g. Rellenos de excavaciones para tuberías de servicios con baja compactación, que se asentaron bajo las cargas del tráfico y dejaron las losas con bajo soporte.
- h. Junta losa / sardinel sin sello, que permite el ingreso de agua a la capa de base, cuyos finos plásticos la absorben y disminuyen la capacidad de soporte de la base.

## AGRADECIMIENTOS

La Directora General del IDU, Dra. MARIA ISABEL PATIÑO, autorizó la publicación de este artículo. El Coordinador del Convenio IDU-UN, Ing. FIDEL ALONSO OVALLES hizo aportes importante durante el desarrollo del trabajo. Se agradece la colaboración de los auxiliares de ingeniería Sres. JOSE MUÑOZ, FABIO LINARES y GABRIEL FONSECA por su valiosa ayuda en la edición del informe.

## REFERENCIAS

AASHTO (1998). **Supplement to the AASHTO Guide for Design of Pavement Structures, Part II, - Rigid Pavement Design & Rigid Pavement Joint Design.** American Association of State Highway and Transportation Officials, USA, 74 p

Asesoría, Consultoría e Interventoría Ltda., ACI. (2000). **Interventoría de la Evaluación y Rehabilitación de vías del Grupo No. 14 en Santa Fe de Bogotá D.C.** Ensayos de campo y laboratorio. Junio a noviembre de 2000. Bogotá D.C.

Asesoría, Consultoría e Interventoría Ltda., ACI. (2001). **Causas y responsabilidad de las fallas del pavimento.** Interventoría de la Evaluación y Rehabilitación de vías del Grupo No. 14 en Santa Fe de Bogotá D.C. Julio 13 de 2001, Bogotá.

ASOCRETO (2001). **Informe de comentarios y recomendaciones**. Obra Calle 91 L Sur entre Av. Usme y Av. Villavicencio. Bogotá.

Corredor Q., M.L., y, Vargas T., M.C. (1988). **Influencia del tipo y calidad del cemento en las características del concreto. II Parte**. Proyecto de Grado, Departamento de Ingeniería Civil, Universidad Nacional de Colombia, Bogotá.

Gutiérrez G., C.I. (2001). **Revisión del pavimento de la Calle 91L Sur**. Julio 28, Bogotá.

Gutiérrez G. C.I. (2003). **Informe del especialista de la Unión temporal Vargas Velandia – La Vialidad Ltda**. Enero 8, Bogotá D.C.

Huang, Y. H. (1993). **Pavement Analysis and Design**. Prentice Hall, Englewood Cliffs, N.J., 805 p.

INV (1998). **Especificaciones generales de construcción de carreteras**. Artículo 300-96, Bogotá.

Sociedad Colombiana de Ingenieros. (2002). **Concepto técnico sobre los diseños y tráfico que ha soportado y soporta la vía del tramo de la Calle 91L Sur (Transversal 3H) entre Avenida Usme y Autopista al llano**. Noviembre de 2002. Bogotá D.C.

Vargas-Velandia – La Vialidad Ltda. (2000). **Evaluación y rehabilitación de vías Grupo 14 (Localidades: Mártires, Usme y San Cristóbal)**, en Santa Fe de Bogotá D.C. Localidad de Usme, Calle 91L Sur (Tv. 3H). Informe Ejecutivo, Bogotá D.C.

Vargas Velandia. (2000). **“Video sobre el tránsito de volquetas para tránsito “off road”**”. Febrero 28 y marzo 01 de 2000. Bogotá D.C.

Universidad Nacional de Colombia. (2001). **Concepto Técnico**. Facultad de Artes, Oficina de Proyectos, Diciembre 3, Bogotá D.C.

\*\*\*\*\*