

Universidad de Buenos Aires

HIGHWAY CAPACITY  
MANUAL 2016  
CARACTERÍSTICAS  
BÁSICAS

Ing. Jorge Felizia  
Ing. Leonardo Felizia

2018



MAESTRIA EN PLANIFICACIÓN Y GESTIÓN DE TRANSPORTE

# TABLA DE CONTENIDO

1	MODOS DE TRANSPORTE ESTUDIADOS.....	2
2	CONDICIONES OPERATIVAS .....	2
2.1	Flujo ininterrumpido .....	2
2.2	Flujo interrumpido .....	2
3	VARIABLES BÁSICAS EN EL TRÁNSITO .....	2
4	VOLUMEN Y FLUJO EQUIVALENTE.....	2
4.1	Variaciones temporales en la demanda.....	4
4.1.1	Ciclos estacionales y mensuales .....	5
4.1.2	Ciclos diarios .....	5
4.1.3	Ciclos horarios.....	5
4.1.4	Determinación de la hora de diseño.....	5
4.2	Variaciones espaciales en la demanda .....	6
4.2.1	Distribución direccional .....	7
4.2.2	Distribución por carril .....	7
5	VELOCIDAD .....	7
5.1	Características de la velocidad.....	8
5.2	Variabilidad en los tiempos de viaje.....	8
6	DENSIDAD.....	9
6.1	Separación entre vehículos e intervalo.....	9
6.2	Relaciones matemáticas .....	10
7	RELACIONES ENTRE LOS PARÁMETROS BÁSICOS .....	10
8	FACTORES QUE AFECTAN EL MODO AUTOMOTOR.....	11
8.1	Características del vehículo .....	11
8.2	Características del conductor .....	12
8.2.1	Distancia de visibilidad .....	13
8.2.2	Otros factores.....	13
9	CAPACIDAD.....	13
10	NIVEL DE SERVICIO.....	13

# CARACTERÍSTICAS BÁSICAS

## 1 MODOS DE TRANSPORTE ESTUDIADOS

Las metodologías se analizan por separado para cuatro modos de transporte:

- automóviles
- peatones
- bicicletas
- autotransporte público

## 2 CONDICIONES OPERATIVAS

### 2.1 Flujo ininterrumpido

Es el que se da en infraestructuras viales que no tienen elementos físicos externos a la corriente de tránsito que causan interrupciones en el mismo. Las condiciones de operación son consecuencia de la interacción del tránsito:

- en sí mismo
- con la geometría de la ruta
- con el medio

Estas características describen el tipo de infraestructura, no la calidad del servicio.

### 2.2 Flujo interrumpido

Es el que se da en infraestructuras viales que tienen elementos físicos externos que causan interrupciones.

## 3 VARIABLES BÁSICAS EN EL TRÁNSITO

Para la descripción de las condiciones de tránsito en cualquier camino se utilizan tres variables básicas: volumen, velocidad y densidad. En general el volumen se puede utilizar tanto en flujo ininterrumpido como en flujo interrumpido, pero velocidad y densidad en general se utilizan para flujo ininterrumpido. Algunas variables relacionadas con el volumen, tales como separación entre vehículos e intervalo, se usan para ambos tipos de flujos, mientras que otras variables tales como flujo de saturación o discontinuidad, son específicas de flujo interrumpido.

## 4 VOLUMEN Y FLUJO EQUIVALENTE

El volumen y el flujo equivalente son dos medidas que cuantifican la cantidad de tránsito que pasa por un carril o camino durante un intervalo dado de tiempo. Estos términos se definen de la siguiente manera:

- Flujo equivalente es el equivalente horario al cual los vehículos pasan por un punto o tramo dado de un carril o camino durante un determinado intervalo de tiempo menor que una hora, generalmente 15 minutos.
- El volumen es una variable que se utiliza para cuantificar la demanda, vale decir el número de ocupantes de vehículos o conductores (generalmente expresados en número de vehículos) que desea utilizar una infraestructura dada durante un período de tiempo específico. La congestión influye sobre los esquemas de demanda, y los volúmenes que se observan en muchos casos reflejan más las restricciones de capacidad que la verdadera demanda.

La distinción entre volumen y flujo equivalente es importante. El volumen es el verdadero número de vehículos observados o que se estima pasarán por un punto durante un determinado lapso. El flujo equivalente representa el número de vehículos que pasan por un punto durante un intervalo de tiempo menor que una hora, pero expresado como un equivalente horario. El flujo equivalente se calcula tomando el número de vehículos observado durante un período fracción de una hora, y dividiéndolo por el tiempo (en horas), durante el cual se realizó la observación.

**TABLA 1: VOLUMEN Y FLUJO EQUIVALENTE**

<b>Período</b>	<b>Volumen (vehículos)</b>	<b>Flujo equivalente (vph)</b>
08:00 a 08:15	100	400
08:15 a 08:30	200	800
08:30 a 08:45	150	600
08:45 a 09:00	150	600
08:00 a 09:00	600	800

*Fuente: Highway Capacity Manual 2016*

En la Tabla 1, los volúmenes se observaron durante cuatro períodos consecutivos de 15 minutos. El volumen total de la hora es la sumatoria de los mismos, o sea 600 vehículos, o dicho en otra forma, 600 vph (dado que la observación se realizó durante una hora). Sin embargo, el flujo equivalente, varía en cada uno de los períodos.

Hay un período durante el cual el flujo equivalente es 800 vph. Obsérvese que los 800 vehículos en cuestión no pasan durante la hora del estudio, pero si lo hacen para la relación de los 15 minutos.

Puede suceder que el volumen promedio de una hora determinada no supere la capacidad, pero que haya un período de quince minutos dentro de la misma en la que sí se supere dicha capacidad. Esta es una situación alarmante, porque las condiciones de congestión tardan en disiparse, por lo que los efectos indeseados pueden extenderse más allá de los 15 minutos identificados.

Las máximas relaciones de flujo se representan en los volúmenes horarios con el uso del Factor de Hora Pico (FHP). Este factor se define como la relación entre el volumen horario total y el máximo flujo equivalente durante la hora:

Si se utilizan períodos de quince minutos, el FHP se puede calcular como:

$$\text{FHP} = V_h / (4 \times V_{15})$$

donde:

FHP = factor de hora pico

$V_h$  = volumen horario (veh/h)

$V_{15}$  = volumen durante los máximos 15 minutos de la hora (veh/15min)

En los casos en que se conoce el factor de hora pico, se puede utilizar el mismo para convertir un volumen horario en el flujo equivalente máximo, como sigue:

$$V = V_h / \text{FHP}$$

donde:

$V$  = flujo equivalente máximo para un período de 15 minutos (veh/h)

$V_h$  = volumen horario (veh/h)

FHP = Factor de Hora Pico

No se debe utilizar esta ecuación cuando existen conteos de tránsito disponibles y los intervalos del conteo permiten identificar el período de 15 minutos con el volumen máximo de tránsito. En ese caso el volumen pico se calcula directamente como 4 veces el volumen de los 15 minutos máximos.

#### 4.1 Variaciones temporales en la demanda

En lo relativo al volumen, básicamente se utilizan dos medidas que representan los parámetros de comparación para los distintos tipos de análisis. La utilización de uno u otro es función del tipo de estudio que se quiera desarrollar.

El primero es el Tránsito Diario Medio Anual (TMDA) que se define como:

TMDA = Total de vehículos pasantes en un año / número de días del año

El restante es el volumen horario. El volumen de tránsito que pasa durante el período comprendido en una hora es el práctico y adecuado para utilizar en diseño geométrico. Pero en cualquier tramo varía significativamente según la hora del día que se considere, y aún más en distintos días de la semana y épocas del año.

Es necesario tener en cuenta que el volumen horario no es solamente función de la demanda, sino también de la capacidad de la vía, por lo que si bien en muchos casos volumen y demanda coinciden, en situaciones de congestión los valores de volumen que se detecten pueden diferir considerablemente de la demanda real.

#### 4.1.1 Ciclos estacionales y mensuales

Las diferencias que se registran son más severas en rutas turísticas y menores en rutas urbanas o troncales importantes.

#### 4.1.2 Ciclos diarios

También están relacionados con el tipo de ruta y los usuarios que la utilizan. En general los volúmenes de días de fin de semana son menores que los de los días hábiles. Habitualmente, el viernes suele ser el día con mayor tránsito.

#### 4.1.3 Ciclos horarios

Normalmente se presentan con un pico matutino y un pico vespertino. En rutas próximas a centros urbanos, la distribución está estrechamente ligada a los horarios de trabajo. Frecuentemente el pico de la mañana es más agudo que el de la tarde, aunque en poblaciones con interrupción de tareas laborales en horas del mediodía, aparece un tercer pico en ese período.

#### 4.1.4 Determinación de la hora de diseño

El volumen de tránsito que pasa durante el período comprendido en una hora es el práctico y adecuado para utilizar en diseño geométrico. Pero en cualquier tramo varía significativamente según la hora del día que se considere, y aún más en distintos días de la semana y épocas del año.

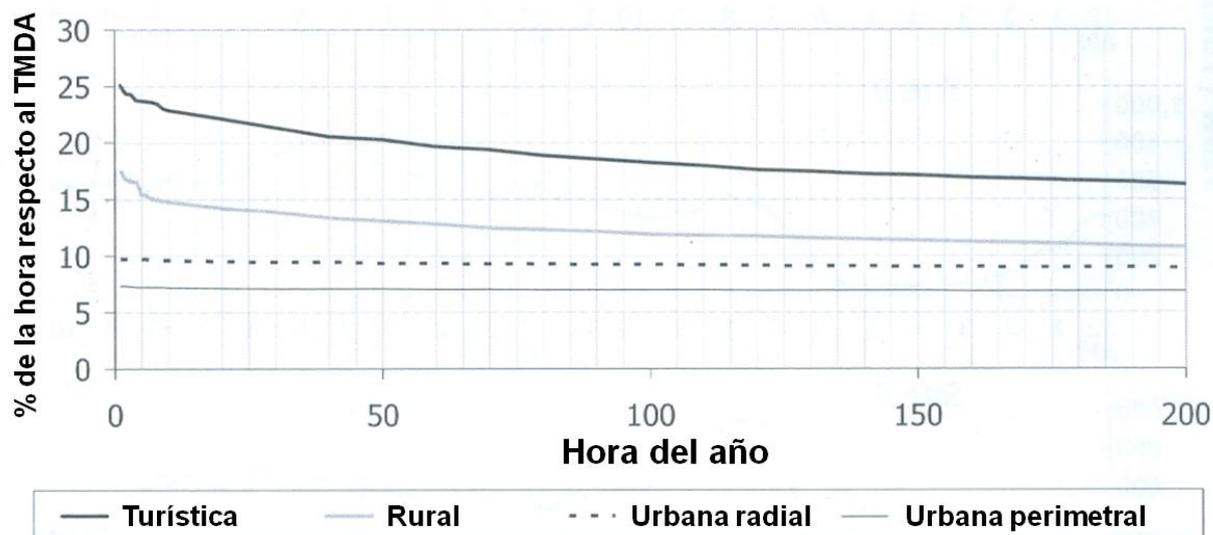
¿Qué utilizar para el diseño?

- la hora de máximo volumen en el año sería antieconómica
- la hora promedio sería insuficiente

El volumen horario seleccionado no debería:

- ser superado muy a menudo
- casi siempre estar subutilizado

FIGURA 2: ORDENAMIENTO DE LOS VOLÚMENES HORARIOS



En estudios urbanos se usa la hora pico del día hábil.

Dado que habitualmente se dispone del TMDA, para determinar el volumen horario de diseño a utilizar en un estudio, se recurre al denominado factor k, que se define como:

$$k = \text{Volumen de la hora de diseño} / \text{TMDA}$$

Esto permite conociendo el TMDA del segmento en estudio, y el valor k para la hora del año seleccionada (30, 50, 100, 200) de un tramo de características operativas similares al del proyecto, estimar el volumen horario de diseño necesario para los cálculos:

$$\text{Volumen de la hora de diseño} = k \times \text{TMDA}$$

La Tabla 2 muestra como ejemplo valores de la hora 30 de diferentes rutas. Se observa claramente como el factor k disminuye a medida que aumenta el TMDA de la ruta.

Período	Volumen (vehículos)	Flujo equivalente (vph)
08:00 a 08:15	100	400
08:15 a 08:30	200	800
08:30 a 08:45	150	600
08:45 a 09:00	150	600
08:00 a 09:00	600	800

*Fuente: Highway Capacity Manual 2016*

**4.2 Variaciones espaciales en la demanda**

#### 4.2.1 Distribución direccional

La distribución direccional es un factor muy importante en los análisis de capacidad de cualquier tipo de infraestructura. Se la analiza con el factor D de direccionalidad que se calcula:

$$D = V_{hD} / V_h$$

$V_{hD}$  = Volumen horario del sentido más cargado

$V_h$  = Volumen horario total

La Tabla 3 muestra valores usuales según el tipo de infraestructura.

<b>TABLA 3: DISTRIBUCIÓN DIRECCIONAL</b>	
<b>Tipo de infraestructura</b>	<b>Factor D</b>
Rural	0,59
Perimetral	0,52
Radial semiurbana	0,60
Radial urbana	0,70

*Fuente: Highway Capacity Manual 2016*

#### 4.2.2 Distribución por carril

Cuando existen disponibles para el tránsito dos o más carriles en un sentido, la utilización de los mismos varía considerablemente. En análisis de niveles de servicio este hecho afecta la confiabilidad de los resultados, dado que en el cálculo implícitamente se está suponiendo una distribución promedio. Los siguientes se pueden mencionar como factores que inciden sobre los usuarios en la elección del carril.

- regulaciones de tránsito
- composición
- velocidad
- volumen
- número y ubicación de puntos de acceso
- orígenes y destinos
- medio ambiente
- hábitos de conducción

## 5 VELOCIDAD

La velocidad se la define como una relación de movimiento expresada en distancia por unidad de tiempo, generalmente en kilómetros por hora (Km/h). Para caracterizar la velocidad de un flujo de tránsito, se debe utilizar algún valor

representativo, porque generalmente hay una amplia distribución de velocidades individuales en una corriente de tránsito.

A un flujo de tránsito se le pueden aplicar varios parámetros de velocidad:

- **Velocidad media de circulación.** Es una medida basada en la observación de los tiempos en que un vehículo atraviesa una sección de longitud conocida. Se la define como la longitud del segmento dividido el tiempo promedio en que los vehículos circulan por el mismo. Incluye únicamente el tiempo que los vehículos están en movimiento.
- **Velocidad media de viaje.** Esta también es una medida de la corriente del tránsito basada en observaciones sobre una longitud conocida de camino. Se define como la longitud del segmento dividido el tiempo promedio de viaje de los vehículos que atraviesan la sección, incluyendo todos los tiempos de demora por detención. Para los análisis de flujo ininterrumpido que no estén operando en congestión, la velocidad media de viaje es igual a la velocidad media de circulación.
- **Velocidad media instantánea.** Es el promedio aritmético de las velocidades de los vehículos que se observan pasando un cierto punto del camino y se la denomina también “velocidad puntual promedio”. Para medir este tipo de velocidad se utilizan radares u otro tipo de instrumentos.

Cuando se la utiliza como una medida de eficiencia, los criterios de velocidad deben tener en cuenta las expectativas de los usuarios y la función del camino. Un conductor espera poder desarrollar una velocidad mayor en una autopista que en una arterial urbana. Se toleran velocidades menores en caminos con trazado horizontal y vertical muy severos, ya que los usuarios no se sentirían cómodos circulando a velocidades demasiado altas. Los niveles de servicio reflejan estos aspectos.

### 5.1 Características de la velocidad

La velocidad se mantiene relativamente constante a pesar de los volúmenes de tránsito hasta que se llega a valores significativos de estos últimos. También se mantiene estable durante las distintas horas del día. Solo se percibe una pequeña disminución en las velocidades en horas nocturnas. En lo que hace a los días de la semana, las velocidades son ligeramente inferiores los fines de semana en comparación con los días de semana. Esto puede deberse a usuarios menos familiarizados con el camino o a un menor sentido de urgencia en la conducción.

### 5.2 Variabilidad en los tiempos de viaje

Se puede deber a distintas causas:

- Incidentes de tránsito tales como vehículos descompuestos, accidentes de tránsito. Aún cuando no haya vehículos bloqueando físicamente un carril, la actividad en la banquina, presencia de gruas, policía, etc., cambia la conducta de los usuarios generando congestiones.

- Zonas de trabajo donde se reduce el número de carriles, el ancho de los mismos, banderilleros. Incluso puede haber señalización limitando las velocidades máximas a valores menores.
- Condiciones ambientales tales como condiciones adversas de tiempo.
- Fluctuaciones de la demanda en días especiales del año.
- Eventos especiales como competiciones deportivas, cortes de rutas, convocatorias sociales.
- Regulaciones del tránsito como barreras ferroviarias o semaforizaciones actuadas o pobremente proyectadas.
- Operación cercana a la capacidad situación en la que pequeñas variaciones de tránsito ocasionan variaciones importantes en la velocidad.

## 6 DENSIDAD

La densidad se la define como el número de vehículos que ocupa una longitud de camino determinada en un cierto instante. A los efectos del cálculo, a la densidad en general se la promedia en el tiempo, y usualmente se la expresa en vehículos por kilómetro (veh/km).

Es difícil medir directamente la densidad en campaña, ya que requiere un atalaya especial desde donde se pueda fotografiar, filmar u observar una longitud importante del camino. No obstante, se la puede calcular con la velocidad media de viaje y el volumen, que pueden ser medidos más fácilmente.

$$D = V / v \quad (1)$$

Donde:

V = volumen (veh/h),

v = velocidad media de viaje (km/h),

D = densidad (veh/km).

La densidad es un parámetro crítico para tramos con flujo ininterrumpido porque caracteriza la calidad de las operaciones de tránsito. Describe la proximidad de vehículos uno a otro y refleja la libertad de maniobra dentro de la corriente de tránsito.

Frecuentemente se utiliza la ocupación del camino como un sustituto de la densidad porque es más fácil de medir. La ocupación en espacio se define como la proporción de longitud del camino cubierta por vehículos, y la ocupación en tiempo identifica la proporción en tiempo que la sección transversal de un camino está ocupada por vehículos. Bajo la suposición de flujo homogéneo de tránsito, y para una composición conocida del mismo, estos dos tipos de ocupación se pueden considerar similares y utilizarlas como un derivado de la densidad.

### 6.1 Separación entre vehículos e intervalo

La separación entre vehículos se define como la distancia entre vehículos sucesivos en una corriente de tránsito, medida desde paragolpes delantero a paragolpes

delantero. El intervalo es el tiempo entre dos vehículos sucesivos cuando ellos pasan por un punto de un carril o un tramo, también medido sobre el paragolpes delantero.

Estas características se las considera “microscópicas” ya que se refieren a pares de vehículos dentro de la corriente de tránsito. Dentro de cualquier corriente de tránsito, tanto la separación entre vehículos como el intervalo de vehículos individuales se distribuye en un rango de valores, que está relacionado con la velocidad y las condiciones prevalecientes del tránsito. En su conjunto, estos parámetros “microscópicos” están relacionados con los parámetros “macroscópicos” densidad y volumen.

## 6.2 Relaciones matemáticas

La separación es una medida de distancia en metros. Se puede medir directamente tomando la distancia entre puntos comunes de vehículos sucesivos en un instante determinado. Esto generalmente requiere de complejas técnicas de fotografías aéreas, por lo que la separación entre vehículos en general se infiere de otras mediciones más directas. El intervalo, por el contrario, puede medirse fácilmente usando un cronómetro y observando los vehículos que pasan por un punto del camino.

La separación promedio entre vehículos en una corriente de tránsito está directamente relacionada con la densidad de la misma:

$$\text{Densidad} = 1.000 / \text{separación entre vehículos}$$

La relación entre la separación promedio entre vehículos y el intervalo promedio en una corriente de tránsito depende de la velocidad:

$$\text{Intervalo (seg/veh)} = \text{separación (m/veh)} / \text{velocidad (m/seg)}$$

Esta relación también se mantiene para separación entre vehículos e intervalos individuales de pares de vehículos. En este caso la velocidad será la del segundo vehículo del par. El volumen también está relacionado con el intervalo promedio del tránsito:

$$\text{Volumen (veh/h)} = 3600 \text{ (seg/h)} / \text{intervalo (seg/veh)}$$

## 7 RELACIONES ENTRE LOS PARÁMETROS BÁSICOS

La ecuación (1) muestra la relación básica entre las tres variables que describen un flujo de tránsito ininterrumpido. Aunque la ecuación permite algebraicamente infinitas combinaciones de velocidad y densidad para un volumen dado, hay relaciones adicionales que restringen la variedad de volúmenes que pueden existir en un punto dado.

La Figura 1, muestra una representación generalizada de estas relaciones, que constituyen la base filosófica del análisis de capacidad en condiciones de flujo ininterrumpido.

La capacidad se alcanza cuando el producto densidad por velocidad es máximo. Esta condición se da en la velocidad óptima,  $v_{cap}$  (llamada velocidad crítica), en la densidad óptima,  $D_{cap}$  (llamada densidad crítica) y en el máximo volumen  $V_{max}$

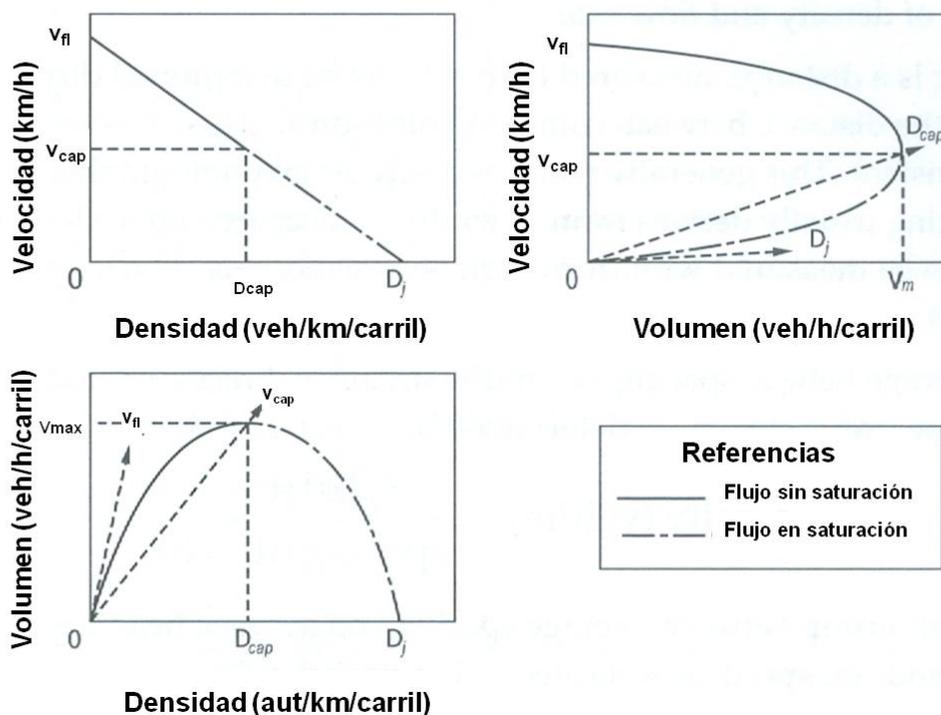
Un mismo volumen puede ocurrir en dos velocidades diferentes. Un sector representa los niveles de servicio de A a E, el otro representa el nivel F.

Asímismo, también un mismo volumen puede ocurrir en dos densidades diferentes. Un sector representa los niveles de servicio de A a E, el otro representa el nivel F.

La pendiente de cualquier línea desde el origen de la curva velocidad - volumen, a cualquier punto de la misma, representa la densidad (como la fórmula es  $V/v$ , el ángulo es el complementario).

La pendiente de cualquier línea desde el origen de la curva volumen - densidad, representa la velocidad (la fórmula es  $V/D$ )

**FIGURA 1: RELACIONES ENTRE LOS PARÁMETROS BÁSICOS**



## 8 FACTORES QUE AFECTAN EL MODO AUTOMOTOR

### 8.1 Características del vehículo

Los vehículos automotores incluidos en los análisis son:

- Autos
- Camiones
- Camionetas
- Ómnibus

- Recreacionales
- Motocicletas

En todos los estudios que se realizan, la composición del tránsito tiene una incidencia fundamental, debido a las diferencias operativas que existen entre los distintos tipos de vehículos.

Los elementos que básicamente intervienen en la operación de los automotores son:

- Tipo
- Dimensiones
- Peso
- Radios de giro
- Resistencia al movimiento
- Rendimiento de aceleración y desaceleración

Cada uno de ellos tiene sus propias particularidades de peso, longitud, tamaño y características operativas. Todas estas condiciones afectan el cálculo de gastos de combustible, tiempos de viaje, tiempo de fases de semáforos, etc.

Después de una detención, un automóvil acelera en un rango que oscila entre 1,65 y 2,70 metros/s<sup>2</sup>. En el caso de un camión esos valores están entre 0,20 y 0,90 metros/s<sup>2</sup>. Los límites de desaceleración razonables en un automóvil van de 3,00 a 7,50 metros/s<sup>2</sup>. La desaceleración en camiones es de 1,95 metros/s<sup>2</sup> o menos.

## 8.2 Características del conductor

La conducción es una tarea compleja que requiere una amplia variedad de destrezas. La más importante de ellas es la de recibir y procesar información y tomar rápidas decisiones sobre la base de dicha información.

Las tareas del conductor se agrupan en tres grandes categorías:

- Control: implica la interacción del conductor con el vehículo en términos de velocidad y dirección (acelerado, frenado, volante).
- Conducción: tiene que ver con la circulación segura y el mantenimiento del vehículo dentro de los carriles.
- Navegación: consiste en la planificación y ejecución del viaje.

La forma en que los conductores perciben y procesan la información es importante. El 90% de la misma se presenta visualmente. Un parámetro que se utiliza para cuantificar la velocidad a la cual los usuarios procesan la información es el tiempo de percepción-reacción, que representa cuán rápido un conductor puede responder a una emergencia.

### 8.2.1 Distancia de visibilidad

Está directamente asociada al tiempo de reacción. Hay tres tipos de distancia de visibilidad:

- De frenado
- De sobrepaso
- De decisión

### 8.2.2 Otros factores

También inciden sobre la conducción de un automotor:

- Manejo nocturno
- Fatiga
- Influencia del alcohol y las drogas
- Edad
- Salud
- Presencia policial

Todos los elementos mencionados afectan los parámetros operacionales de velocidad, demora y densidad.

## 9 CAPACIDAD

Es el máximo volumen horario equivalente de vehículos que razonablemente se puede esperar pase por un punto o un tramo durante un período dado de tiempo en las condiciones prevalecientes de geometría, de tránsito y de control.

## 10 NIVEL DE SERVICIO

Es una medida cualitativa que describe las condiciones de operación de un flujo de tránsito y su percepción por los conductores y/o pasajeros, relacionadas con la velocidad, el tiempo de viaje, la libertad de maniobra, las interrupciones y el confort.

Se designa de la A a la F.