

# Apéndice F

## Determinación del THIV, PHD y ASI

### F1 INTRODUCCIÓN

El Comité Europeo de Normalización (CEN) adoptó la Velocidad de Impacto Teórica de la Cabeza (THIV) y asoció la Desaceleración de la Cabeza después del Impacto (PHD) y el Índice de Gravedad de la Aceleración (ASI) como medidas de riesgo del ocupante con el propósito de evaluar los resultados de un ensayo de choque (140-142). Están presentados aquí con la esperanza y expectativa que los responsables de ensayos en los EE.UU determinen e informen estos índices. El objetivo de este esfuerzo es: (a) desarrollar una base de datos en la cual se puedan hacer comparaciones entre el THIV, ASI, los índices de espacio de latigazo recomendados aquí y otras medidas de riesgo del ocupante y (b) proveer una base en la cual se pueden formular los ensayos futuros y procedimientos de evaluación y armonizar los procedimientos entre los Estados Unidos, la CEN y otros países.

### F2 UNA GUÍA PARA LA MEDIDA DE LA VELOCIDAD DE IMPACTO TEÓRICA DE LA CABEZA (THIV) Y LA DESACELERACIÓN DE LA CABEZA DESPUÉS DEL IMPACTO (PHD)

#### F2.1 GENERALIDADES

El concepto de la Velocidad de Impacto Teórica de la Cabeza ha sido desarrollado para evaluar la severidad de impacto del ocupante para los vehículos involucrados en colisiones con sistemas de restricción del vehículo (78). El ocupante es considerado un objeto libremente movable (cabeza) que, mientras el vehículo cambia su velocidad durante el contacto con el sistema de seguridad, continúa moviéndose hasta que choque con una superficie dentro del interior del vehículo. La magnitud de la velocidad del impacto teórico de la cabeza es considerada como una medida de severidad del impacto.

Se presume que la cabeza permanece en contacto con la superficie durante el resto del periodo de impacto. Al hacerlo, experimenta los mismos niveles de aceleración que el vehículo durante el periodo de contacto restante (Desaceleración de la Cabeza después del Impacto - PHD) (78).

#### F2.2 VELOCIDAD DE IMPACTO TEÓRICA DE LA CABEZA (THIV)

Se puede suponer que al comienzo del contacto vehicular con el artículo de ensayo, ambos, el vehículo y la cabeza teórica tienen la misma velocidad horizontal,  $V_0$ , y el movimiento del vehículo es solo de traslación.

Durante el impacto, se asume que el vehículo se mueve solamente en un plano horizontal, debido a que los altos niveles de cabeceo, balanceo o movimientos verticales no son de principal importancia a no ser que el vehículo vuelque. Este evento extremo no necesita ser considerado, ya que en este caso, se toma la decisión de rechazar el sistema en ensayo, en base a la observación virtual o registro fotográfico.

Se utilizan dos marcos de referencia, como lo indica la Figura F-1. El primero de estos es una referencia vehicular  $C_{xy}$ , siendo  $x$  la componente longitudinal e  $y$  la transversal; el origen  $C$  es un punto en el centro de masa del vehículo, o cercano a ella, donde en general son instalados dos acelerómetros y un giroscopio de radio (ver Sección 4.3.2 para los procedimientos recomendados para determinar las aceleraciones y la velocidad de rotación en  $C$  si el instrumental no puede ser colocado en el centro de masa o cercano a ella). Supongamos que



$x_c$  e  $y_c$  son las aceleraciones del punto C en  $\text{ft/s}^2$  ( $\text{m/s}^2$ ), sobre los ejes  $x$  e  $y$  del vehículo, respectivamente, registrados en los dos acelerómetros y  $\Psi$  la velocidad de rotación (en radianes por segundo), grabado desde el giroscopio ( $\ddot{x}$  positivo hacia el frente,  $\ddot{y}$  positivo hacia el costado derecho y  $\Psi$  positivo en dirección de las agujas del reloj mirando desde arriba).

El segundo marco de referencia es una referencia en el piso  $OXY$  con el eje  $x$  alineado con la velocidad vehicular inicial  $V_0$  y el origen  $O$  coincidiendo con la posición inicial del punto C del vehículo.

$X_c(t)$ ,  $Y_c(t)$  son las coordenadas de la referencia del piso del punto C del vehículo, mientras que  $X_b(t)$ ,  $Y_b(t)$  son las coordenadas de piso de la cabeza teórica (ver Figura 2).

Con estas definiciones y simplificando las hipótesis, los movimientos de vehículo y cabeza teórica pueden ser computados de la siguiente manera:

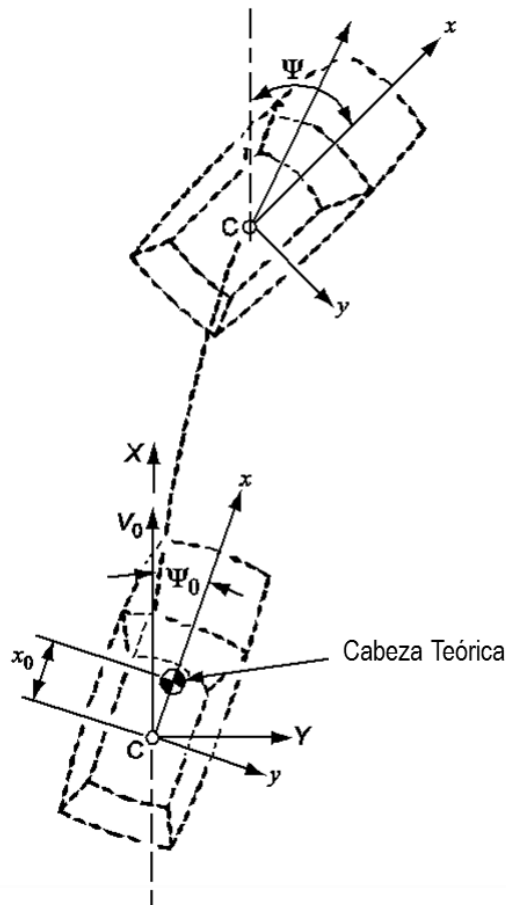


Figura F-1. Marcos de referencia de Piso y Vehículo

## MOVIMIENTO VEHICULAR

Condición inicial: al inicio  $t = 0$ ,

$$\begin{cases} X_c = 0 & Y_c = 0 & \Psi = \Psi_0 \\ \dot{X}_c = V_0 & \dot{Y}_c = 0 & \dot{\Psi} = 0 \end{cases} \quad (\text{Ecuación F2-1})$$



El ángulo de rotación  $\Psi$  es computado mediante la integración del radio de rotación  $\dot{\Psi}$  :

$$\Psi(t) = \int_0^t \dot{\Psi} dt + \Psi_0 \quad (\text{Ecuación F2-2})$$

Luego, de los componentes de la aceleración vehicular en la referencia del piso:

$$\begin{cases} \ddot{X}_c = \ddot{x}_c \cos \psi - \ddot{y}_c \sin \psi \\ \ddot{Y}_c = \ddot{x}_c \sin \psi + \ddot{y}_c \cos \psi \end{cases} \quad (\text{Ecuación F2-3})$$

La posición y velocidad vehicular son obtenidas por integración:

$$\begin{cases} \dot{X}_c = \Delta \dot{X}_c + V_0 & \Delta \dot{X}_c = \int_0^t \ddot{X}_c dt \\ \dot{Y}_c = \Delta \dot{Y}_c & \Delta \dot{Y}_c = \int_0^t \ddot{Y}_c dt \end{cases} \quad (\text{Ecuación. F2-4})$$

$$\begin{cases} X_c = \int_0^t \Delta \dot{X}_c dt + V_0 t \\ Y_c = \int_0^t \Delta \dot{Y}_c dt \end{cases} \quad (\text{Ecuación F2-5})$$

## MOVIMIENTO TEÓRICO DE LA CABEZA RELATIVO AL PISO

Condición inicial: al inicio  $t = 0$

$$\begin{cases} X_b = x_0 \cos \psi_0 = X_0 & Y_b = x_0 \sin \psi_0 = Y_0 \\ \dot{X}_b = V_0 & \dot{Y}_b = 0 \end{cases} \quad (\text{Ecuación F2-6})$$

Luego, si la cabeza teórica continúa sus movimientos uniformes:

$$X_b = V_0 t + X_0 \quad Y_b = Y_0 \quad (\text{Ecuación F2-7})$$

## MOVIMIENTO TEÓRICO DE LA CABEZA RELATIVA AL VEHÍCULO

Los componentes vehiculares de la velocidad relativa de la cabeza teórica son:



$$\begin{cases} v_x(t) = -\Delta\dot{X}_c \cos \psi - \Delta\dot{Y}_c \sin \psi + y_b \dot{\psi} \\ v_y(t) = \Delta\dot{X}_c \sin \psi - \Delta\dot{Y}_c \cos \psi - x_b \dot{\psi} \end{cases} \quad (\text{Ecuación F2-8})$$

Las coordenadas de la cabeza teórica respecto a los marcos del vehículo pueden ser obtenidas mediante la fórmula:

$$x_b(t) = \Delta X_b \cos \Psi + \Delta Y_b \sin \Psi \quad \Delta X_b = X_0 - \int_0^t \Delta \dot{X}_c dt$$

Donde: (Ecuación. F2-9)

$$y_b(t) = -\Delta X_b \sin \Psi + \Delta Y_b \cos \Psi \quad \Delta Y_b = Y_0 - \int_0^t \Delta \dot{Y}_c dt$$

### TIEMPO DE VUELO

Se supone que las superficies de impacto hipotéticas dentro del vehículo son planas y perpendiculares a los ejes vehiculares  $x$  e  $y$  (ver Figura F-2). Las distancias de dichas superficies de la posición original de la cabeza (distancias de *latigazo*) son  $D_x$  hacia el frente y  $D_y$  lateralmente en ambos lados.

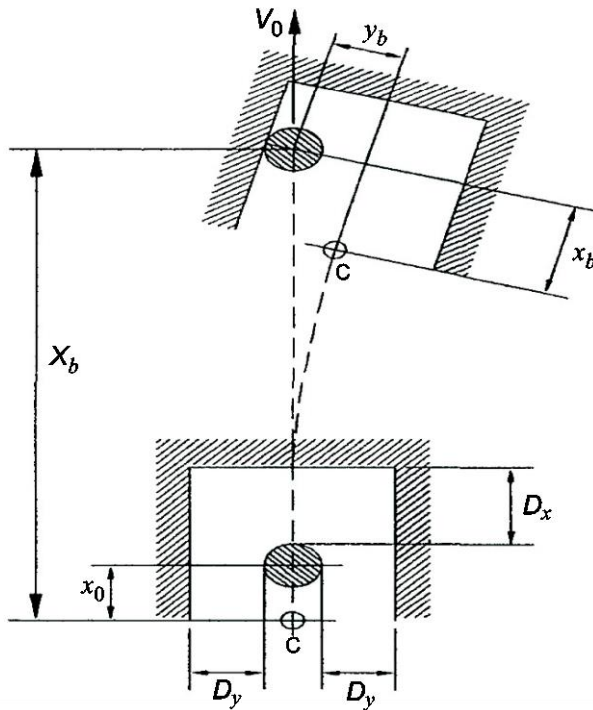


Figura F-2. Impacto de la Cabeza Teórica en el Lado Izquierdo

El tiempo de vuelo de la cabeza teórica es el tiempo del impacto en una de las tres superficies hipotéticas en la Figura F-2, es decir, el tiempo  $T$  más corto cuando sea satisfecha una de las tres siguientes igualdades:



$$x_b(T) = D_x + x_0 \quad \text{or} \quad y_b(T) = D_y \quad \text{or} \quad y_b(T) = -D_y \quad (\text{Ecuación F2-10})$$

Los valores de las distancias de *latigazo* estándares son:

$$D_x = 2 \text{ ft} (0.6 \text{ m}) \quad D_y = 1 \text{ ft} (0.3 \text{ m})$$

## THIV

Para finalizar, la Velocidad de Impacto Teórica de la Cabeza (THIV) es la velocidad relativa en el tiempo  $T$ , es decir:

$$\text{THIV} = \left[ v_x^2(T) + v_y^2(T) \right]^{1/2}$$

El THIV debe ser informado en pies/s (m/s).

## F2.3 DESACELERACIÓN DE LA CABEZA DESPUÉS DEL IMPACTO (PHD)

La Desaceleración de la Cabeza después del Impacto (PHD) es el valor máximo de la aceleración filtrada por un filtro de paso bajo de 10 Hz, que ocurre después del tiempo  $T$  de la colisión de la cabeza teórica. Si  $F_{10}$  representa la filtración, entonces:

$$\text{PHD} = \text{MAX} \left[ F_{10} \left( \ddot{x}_c^2 + \ddot{y}_c^2 \right)^{1/2} \right] \quad (\text{for } t > T)$$

El PHD debe ser informado en unidades de G.

## F2.4 RESUMEN DEL PROCEDIMIENTO PARA CALCULAR EL THIV Y EL PHD

1. Registrar las aceleraciones vehiculares y la velocidad de rotación y almacenar en formato digital en un radio de muestras  $S$ , dejar que los datos en los tres archivos grabados sean  ${}^k\ddot{x}_c, {}^k\ddot{y}_c, {}^k\dot{\Psi} (k=1, 2, \dots, N)$ . El intervalo de tiempo entre los dos datos subsiguientes en el archivo de registro es  $h = {}^kt - {}^{k-1}t = 1/S$ .

Por ejemplo, si  $S = 500$  muestras por segundo, entonces  $h = 2 \text{ ms}$ .

2. Integrar el radio de rotación mediante la fórmula recurrente (de la Ecuación F2-2):

$${}^1\Psi = \Psi_0; \quad {}^2\Psi = {}^1\Psi + h \frac{{}^1\dot{\Psi} + {}^2\dot{\Psi}}{2}; \quad \dots; \quad {}^{k+1}\Psi = {}^k\Psi + h \frac{{}^k\dot{\Psi} + {}^{k+1}\dot{\Psi}}{2}$$

3. Calcular la aceleración vehicular con referencia al piso (de la Ecuación F2-3):



$${}^k\ddot{X}_c = {}^k\ddot{x}_c \cos {}^k\Psi - {}^k\ddot{y}_c \sin {}^k\Psi \quad {}^k\ddot{Y}_c = {}^k\ddot{x}_c \sin {}^k\Psi - {}^k\ddot{y}_c \cos {}^k\Psi$$

4. Integrar la aceleración vehicular con referencia al piso (de la Ecuaciones F2-4 y F2-9):

$$\begin{cases} {}^1\Delta\dot{X}_c = 0; & {}^{k+1}\Delta\dot{X}_c = {}^k\Delta\dot{X}_c + h \frac{{}^k\Delta\ddot{X}_c + {}^{k+1}\Delta\ddot{X}_c}{2} \\ {}^1\Delta\dot{Y}_c = 0; & {}^{k+1}\Delta\dot{Y}_c = {}^k\Delta\dot{Y}_c + h \frac{{}^k\Delta\ddot{Y}_c + {}^{k+1}\Delta\ddot{Y}_c}{2} \end{cases}$$

$$\begin{cases} {}^1\Delta X_b = X_0; & {}^{k+1}\Delta X_b = {}^k\Delta X_b - h \frac{{}^k\Delta\dot{X}_c + {}^{k+1}\Delta\dot{X}_c}{2} \\ {}^1\Delta Y_b = 0; & {}^{k+1}\Delta Y_b = {}^k\Delta Y_b - h \frac{{}^k\Delta\dot{Y}_c + {}^{k+1}\Delta\dot{Y}_c}{2} \end{cases}$$

5. Calcular la posición relativa y velocidad relativa de la cabeza teórica como funciones del tiempo (de las dos últimas ecuaciones en el punto 4):

$$\begin{cases} {}^k x_b(t) = {}^k\Delta X_b \cos {}^k\Psi + {}^k\Delta Y_b \sin {}^k\Psi \\ {}^k y_b(t) = {}^k\Delta X_b \sin {}^k\Psi + {}^k\Delta Y_b \cos {}^k\Psi \end{cases}$$

$$\begin{cases} {}^k v_x = -{}^k\Delta\dot{X}_c \cos {}^k\Psi - {}^k\Delta\dot{Y}_c \sin {}^k\Psi + {}^k y_b {}^k\dot{\Psi} \\ {}^k v_y = -{}^k\Delta\dot{X}_c \sin {}^k\Psi - {}^k\Delta\dot{Y}_c \cos {}^k\Psi + {}^k x_b {}^k\dot{\Psi} \end{cases}$$

6. Encontrar el valor mínimo de  $j$  por el cual una de las tres equivalencias sea satisfecha:

$${}^j x_b = D_x + X_0; \quad \text{or} \quad {}^j y_b = D_y; \quad \text{or} \quad {}^j y_b = -D_y$$

7. Calcular lo siguiente:



$$\text{THIV} = \left[ {}^j v_x^2 + {}^j v_y^2 \right]^{1/2}$$

8. Calcular la aceleración vehicular resultante en G como una función del tiempo:

$${}^k A = \frac{1}{G} \left( {}^k \ddot{x}_c^2 + {}^k \ddot{y}_c^2 \right)^{1/2}$$

9. Filtrar la secuencia  ${}^k A$  con un filtro de paso bajo digital Butterworth, teniendo una frecuencia de corte de 10 Hz, una descarga de 48 dB/octava y aplicando un promedio de movimiento de 10-ms; el PHD es el máximo de esta secuencia filtrada.

### F3 UNA GUÍA PARA MEDIR EL ÍNDICE DE GRAVEDAD DE LA ACELERACIÓN (ASI)

#### F3.1 PROCEDIMIENTO

El Índice de Gravedad de la Aceleración (ASI), desarrollada por el TTI (100), es una función de tiempo, calculada con la siguiente fórmula:

$$\text{ASI}(t) = \left[ \left( \bar{a}_x / \hat{a}_x \right)^2 + \left( \bar{a}_y / \hat{a}_y \right)^2 + \left( \bar{a}_z / \hat{a}_z \right)^2 \right]^{1/2} \quad (\text{Ecuación F3-1})$$

Donde  $\hat{a}_x$ ,  $\hat{a}_y$ , y  $\hat{a}_z$  are son los valores límite para los componentes de la aceleración junto con los ejes del cuerpo x, y, y z;  $\bar{a}_x$ ,  $\bar{a}_y$ , y  $\bar{a}_z$  son los componentes de la aceleración de un punto elegido  $P$  del vehículo, promediado sobre un intervalo de tiempo de movimiento  $\delta = 50$  ms, para que:

$$\bar{a}_x = \frac{1}{\delta} \int_t^{t+\delta} a_x dt; \quad \bar{a}_y = \frac{1}{\delta} \int_t^{t+\delta} a_y dt; \quad \bar{a}_z = \frac{1}{\delta} \int_t^{t+\delta} a_z dt \quad (\text{Ecuación F3-2})$$

El índice ASI está destinado a dar una medida de la gravedad del movimiento vehicular durante un impacto para una persona sentada en la proximidad del punto P.

Los promedios calculados en la Ecuación F3-2 son equivalentes a lo que se obtendría con un filtro de paso bajo y toman en cuenta el hecho de que las aceleraciones vehiculares pueden ser transmitidas al cuerpo del ocupante mediante contactos relativamente suaves, los cuales no pueden pasar las frecuencias más altas. El uso directo de las aceleraciones vehiculares, incluso si se promedian, implica que las partes del cuerpo del ocupante que pueden ser lesionadas están en contacto continuo con alguna parte del vehículo.

Obsérvese que la Ecuación F3-1 es una fórmula de interacción básica de tres variables. Si dos de los componentes de la aceleración vehicular son nulos, el ASI llega a su valor límite de 1 cuando el tercer componente llega a su límite de aceleración. Cuando dos o tres componentes no son nulos, el ASI puede ser 1 con los componentes individuales por debajo de los límites relevantes. Las aceleraciones límites son interpretadas como los valores por debajo de los cuales el riesgo del ocupante es muy pequeño (como máximo heridas leves).



En Europa (Francia, Alemania y Países Bajos), el límite de aceleración generalmente utilizado, para los ocupantes que usan cinturón de seguridad, es:

$$\hat{a}_x = 12G, \quad \hat{a}_y = 9G, \quad \hat{a}_z = 10G \quad (\text{Ecuación F3-3})$$

donde  $G = 32 \text{ ft/s}^2$  ( $9.81 \text{ m/s}^2$ ) es la aceleración de la gravedad de la Tierra al nivel de mar.

Con la definición anterior, el ASI es una cantidad no dimensional, es decir, una función escalar del tiempo y, en general, del punto del vehículo seleccionado, teniendo sólo valores positivos. Se asume que el riesgo del ocupante es proporcional al ASI. Por lo tanto, el valor máximo alcanzado por ASI en una colisión se adopta como una medida única de la severidad, o:

$$\text{ASI} = \max[\text{ASI}(t)] \quad (\text{Ecuación F3-4})$$

Las aceleraciones vehiculares en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$ , son medidas en el centro de masa del vehículo o cerca de él (ver en Sección 4.3.2 los procedimientos recomendados para determinar las aceleraciones en las direcciones  $x$  e  $y$  en el centro de masa, si los acelerómetros no pueden ser colocados en o cerca de él)

### F3.2 RESUMEN

Como resumen, se utilizan los siguientes pasos para calcular el ASI:

1. Registrar las aceleraciones vehiculares en las direcciones  $x$ ,  $y$  y  $z$  en el centro de masa del vehículo o cercano a él (ver Sección 4.3.2 si los acelerómetros no pueden ser colocados en el centro de la masa o cercanos a él). En general, las aceleraciones son guardadas en una cinta magnética como tres series de números  $N$ , seleccionados en un cierto radio de muestreo  $S$  (muestra/s).

Para estas tres series de medidas donde la aceleración de la gravedad ( $G$ ) es la unidad de medición, calcular:

$$\begin{aligned} &^1a_x, \quad ^2a_x, \quad \dots, \quad ^{k-1}a_x, \quad ^ka_x, \quad ^{k+1}a_x, \quad \dots, \quad ^Na_x \\ &^1a_y, \quad ^2a_y, \quad \dots, \quad ^{k-1}a_y, \quad ^ka_y, \quad ^{k+1}a_y, \quad \dots, \quad ^Na_y \\ &^1a_z, \quad ^2a_z, \quad \dots, \quad ^{k-1}a_z, \quad ^ka_z, \quad ^{k+1}a_z, \quad \dots, \quad ^Na_z \end{aligned}$$

2. Encontrar el número  $m$  de muestras en una ventana promedio de  $\delta = 0.05 \text{ s}$ ; por lo tanto,  $m = \text{INT}(\delta \cdot S) = \text{INT}(0.05 \cdot S)$ , donde  $\text{INT}(R)$  es el entero más cercano a  $R$ . Por ejemplo, si  $S = 500$  muestras por segundo,  $m = 25$ .

3. Computar las aceleraciones promedio de la Ecuación F3-2:



$${}^k\bar{a}_x = \frac{1}{m} \left( {}^k\bar{a}_x + {}^{k+1}a_x + {}^{k+2}a_x + \dots + {}^{k+m}a_x \right) = \frac{1}{m} \sum_{j=k}^{k+m} {}^j a_x$$

$${}^k\bar{a}_y = \frac{1}{m} \left( {}^k\bar{a}_y + {}^{k+1}a_y + {}^{k+2}a_y + \dots + {}^{k+m}a_y \right) = \frac{1}{m} \sum_{j=k}^{k+m} {}^j a_y$$

$${}^k\bar{a}_z = \frac{1}{m} \left( {}^k\bar{a}_z + {}^{k+1}a_z + {}^{k+2}a_z + \dots + {}^{k+m}a_z \right) = \frac{1}{m} \sum_{j=k}^{k+m} {}^j a_z$$

Funciones del tiempo

$${}^k t = h(k + m/2)$$

4. Computar ASI como una función del tiempo con la Ecuación F3-1:

$${}^k \text{ASI} = \left[ \left( {}^k\bar{a}_x / 12 \right)^2 + \left( {}^k\bar{a}_y / 9 \right)^2 + \left( {}^k\bar{a}_z / 10 \right)^2 \right]^{1/2}$$

5. Determinar el ASI como el máximo de las series del  ${}^k \text{ASI}$ .