

## LA APLICABILIDAD DE LAS ECUACIONES DENTRO DEL PROCESO DE RECONSTRUCCION DE ACCIDENTES.

**Alejandro Rico León**

**Físico**

**Investigador-Reconstructor Accidentes de Tránsito.**

Summary: car accident reconstruction can be considered as the technical and scientist analysis of the evidence recollected from the accident, trying to determine in the most probable way how did it happen. The analysis of the accident based on the laws of kinematics, dynamic and conservation, allow the creation of a tool that can be named "the physical model of the accident", which brings a simple interpretation of the accident, associating the real involved elements with basics forms like a box or a stick. Doing the mathematical formulation, which means to write the equations to find the relevant factors considered in the accident analysis, is necessary to know the limits surrounding the equation, the ranges for a variable and what is it really looking for in order to understand the results.

Resumen: la reconstrucción de accidentes puede ser considerada como el análisis técnico y científico de la evidencia recolectada del accidente, intentando determinar de la manera más probable como ocurrió el accidente. El análisis del accidente basándose en las leyes de la cinemática, dinámica y conservación, permite la creación de una herramienta llamada "el modelo físico del accidente", el cual brinda una visualización del accidente, asociando los elementos involucrados en el, con formas básicas como una caja o una vara. Al hacer la formulación matemática, lo que significa escribir las ecuaciones para encontrar los factores relevantes en al análisis del accidente, es necesario conocer los límites de la ecuación, los rangos de una variable y que es lo que realmente se esta buscando para poder entender los resultados.

---

La reconstrucción de un accidente de tránsito (RAT) es entendida como el análisis técnico-científico de los elementos físicos recolectados del accidente de tránsito(A/T) tales como huellas de frenado, de arrastre, de paso, vehículos, fragmentos, en su contexto espacial y temporal, con la finalidad de intentar determinar de la manera más probable como pudo haber ocurrido dicho A/T. Esto se realiza en la mayoría de los casos con fines jurídicos en donde los resultados del análisis juegan un papel importante en la interpretación legal de los roles que desempeñaron los involucrados en el A/T ya sea en términos de imputación o defensa.

Este denominado análisis técnico-científico, se apoya firmemente en leyes de la física tales como: leyes de cinemática que describen el movimiento de los cuerpos, dinámica que estudia el movimiento como respuesta a las fuerzas que actúan sobre los cuerpos, y conservación que estudia las propiedades de los cuerpos en instantes previos y posteriores a un evento; como resultado del manejo del A/T desde el ámbito de la física es posible elaborar durante el proceso de reconstrucción un elemento relevante que puede

ser llamado el "modelo físico del accidente".

Este modelo físico se convierte en una herramienta fundamental porque permite pre-visualizar, guiándose por supuesto en el contexto y los elementos físicos recopilados durante la investigación, cómo posiblemente fue el desarrollo del A/T, estimando el comportamiento de los cuerpos involucrados mediante una serie de asunciones dentro de un margen lógico.

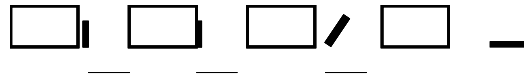
Por ejemplo se esta analizando un A/T, específicamente un atropello, donde se tiene un bus con frente plano, una huella de frenada, una abolladura en la parte frontal, y el peatón que se encuentra en posición final delante de la posición final del bus. Imagen 1.



**Imagen 1**

Partiendo de los parámetros mencionados, se puede entonces crear un modelo físico de "atropello con víctima adelante", donde es posible interpretar las posiciones finales de los cuerpos (bus-victima) y la huella de frenado, como el caso en que el contacto entre el bus y el peatón ocurrió muy probablemente durante el proceso de frenado de emergencia, es decir que

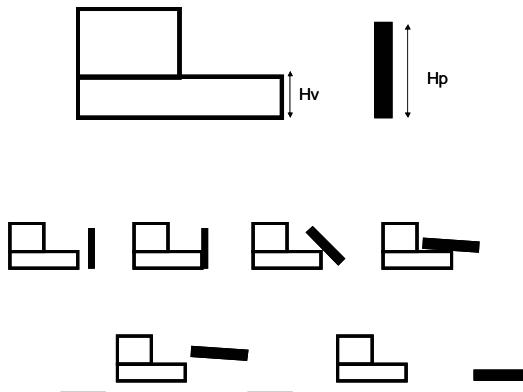
mientras el bus iba marcando la huella de frenado como reacción a un acontecimiento de peligro, fue que ocurrió el atropello. Físicamente puede asociarse el bus con un objeto tipo caja de similares dimensiones y a la persona con una vara rígida de altura similar; resumiendo entonces, se tiene que el modelo físico creado es el de una caja desacelerando (frenando) que impacta una vara de altura (Hp), haciendo que esta caiga (vuela) y se arrastre hasta su posición final. La Imagen 2 ilustra este modelo.



**Imagen 2**

Debe entenderse que este modelo se basa en las circunstancias específicas del tipo de accidente y sus involucrados, y que físicamente es más viable asociar a la persona con una vara que con una esfera o un triángulo; ahora bien, si en vez de un bus se tiene un vehículo con un frente más bajo, un automóvil, puede plantearse un modelo similar, es decir se puede usar de nuevo la vara rígida, pero ahora ya el vehículo no sería una caja si no un objeto con frente de altura (Hv), que influye directamente en el comportamiento post-impacto de la vara, donde la cantidad de energía transferida en velocidad post-impacto al peatón es diferente, porque una parte se consume en la rotación post-impacto de la

"vara". La Imagen 3 ilustra el modelo.



**Imagen 3**

Si ahora para el caso de atropello se tienen la misma evidencia física pero la posición final de la víctima es atrás del frente del bus o automóvil (Imagen 4), pueden utilizarse las mismas asociaciones, pero entra a considerarse que muy probablemente el conductor inicia el proceso de reacción al momento del contacto, es decir que el frenado de emergencia ocurre posterior al atropello. Asumiendo que durante el recorrido post-impacto el vehículo no vuelve a tener contacto con la víctima, puede plantearse un modelo de "atropello con víctima atrás".



**Imagen 4**

Cualquiera que sea el modelo físico planteado, debe ahora materializarse, y esto ocurre cuando se realiza el planteamiento matemático, es decir la formulación de las ecuaciones, con las que se intentará resolver el problema numéricamente para encontrar las incógnitas que se consideran relevantes en el estudio del A/T, tales como lugar de impacto, velocidad de impacto, velocidad pre-impacto, zona de percepción efectiva y de reacción, velocidad al inicio de una huella de frenado, entre otras.

Dependiendo tanto de la complejidad del accidente como del modelo físico planteado, se van generando las ecuaciones necesarias que satisfagan dicho proceso analítico, donde pueden existir ecuaciones con muchas variables o con pocas; pueda ser que una sola ecuación solucione el problema o que la combinación de ecuaciones conlleve a la solución.

Las ecuaciones se extraen de la formulación matemática de la cinemática y la dinámica, según el análisis que se haya hecho del caso; pero también hay ecuaciones de RAT que son formuladas por medio de la experimentación, es decir mediante la realización de varias pruebas con un mismo modelo hasta encontrar un patrón y determinar valores de constantes que ajusten la ecuación a los resultados obtenidos en las pruebas. La escogencia de estas ecuaciones debe hacerse con precaución, dadas las limitantes que tienen estas ecuaciones según el modelo experimental.

Un ejemplo de ecuaciones experimentales, es una que surge con el fin de estimar la velocidad de contacto en un atropello (**V**), cuando se conoce la separación desde la parte anterior del vehículo hasta la posición final de la víctima(**X**) y la altura del centro de masa de la persona (**h**), (Ecuación 1); esta es en esencia una ecuación empírica, porque se realizaron varias pruebas de atropello con un automóvil y un maniquí, donde posteriormente el análisis de los datos recopilados permite plantear una ecuación con variables y constantes que se ajustan a lo visto y medido en las pruebas, y que además logra predecir resultados similares si se realiza la prueba bajo los mismos parámetros. Esta ecuación es aplicable al modelo de atropello con víctima adelante (Imagen 3), pero siempre y cuando el vehículo sea de perfil bajo y la desaceleración del vehículo sea igual a la de la persona.

$$V (mph) = \frac{2.73 X}{\sqrt{h}}$$

**Ecuación 1(i)**

Esto se debe básicamente a que los experimentos fueron realizados con esta clase de vehículos, lo que implica que usarlas para un caso con vehículo tipo caja puede inferir en la objetividad de los resultados. Las consideraciones mencionadas para la utilización de la Ecuación 1 serían entonces sus limitantes de aplicabilidad, dejando ver

que la ecuación por si sola no es en si la solución al problema.

Ahora como ejemplo de ecuaciones extraídas de la cinemática y/o dinámica esta la ecuación para estimar la velocidad de un vehículo(**V**) al inicio de una huella de frenado de longitud (**X**), dejada sobre una vía (Ecuación 2); aunque tenga una forma sencilla y de aparente fácil aplicación, se debe ser cuidadoso inicialmente en cuanto a las limitantes, porque esta ecuación es aplicable solamente si es una vía plana sin pendiente, si el vehículo queda detenido al final de la huella, si la huella esta a lo largo de una misma superficie, si es una huella continua y recta sin cambio brusco de dirección. (Imagen 5). Posteriormente si se cumplen estas directrices de aplicabilidad es necesario saber que valores numéricos escoger para la variable  $\mu$  (coeficiente de fricción entre las llantas y la superficie), porque estos dependen de factores tales como el material de vía, el estado de la vía y el tipo de vehículo que dejo la huella.



**Imagen 5**

$$V_{(km/h)} = 3.6 \sqrt{2 \mu g X}$$

**Ecuación 2**

Para el caso en que no se cumplan las directrices de aplicabilidad de la ecuación para determinar la velocidad al inicio de una huella de frenado, se hace necesario modificar la ecuación incluyendo factores tales como la pendiente de la vía, el coeficiente de fricción ( $\mu$ ) de las otras superficies, la velocidad al final de la huella ( $V_f$ ) y la dirección de desplazamiento del vehículo entre otras, transformándose la Ecuación 2, una vez planteado el modelo y revisadas la leyes físicas, en:

1. 
$$V = 3.6 \sqrt{2 g X (\mu \cos \theta \pm \text{sen } \theta)}$$

- velocidad al inicio de huella de frenado continua sobre una sola superficie, con vehículo detenido al final de la huella, que baja(-) o sube(+) en vía con pendiente  $\theta$ .

2. 
$$V = 3.6 \sqrt{V_f^2 + 2 g X (\mu \cos \theta \pm \text{sen } \theta)}$$

- velocidad al inicio de huella de frenado continua sobre una sola superficie, con vehículo que no está detenido al final de la huella, que baja(-) o sube(+) en vía con pendiente  $\theta$ .

3. 
$$V = 3.6 \sqrt{2 \mu g \left( X + \frac{\beta^2 I}{XM} \right)}$$

- velocidad al inicio de huella de frenado continua sobre una sola superficie plana, con vehículo de masa  $M$  detenido al final de la huella, que se desliza y rota un ángulo  $\beta$ . Depende de las dimensiones del vehículo ( $I$ ).

4. 
$$V = 3.6 \sqrt{2 g \left[ \sum_{n=1}^n X_n (\mu_n \cos \theta \pm \text{sen } \theta) \right]}$$

- velocidad al inicio de huella de frenado continua sobre  $n$  superficies, con vehículo detenido al final de la huella, que baja(-) o sube(+) en vía con pendiente  $\theta$ .

5. 
$$V = 3.6 \sqrt{2 g X \left[ \sum_{n=1}^2 (\mu_n \cos \theta \pm \text{sen } \theta) \right]}$$

- velocidad al inicio de huella de frenado continua cuando el vehículo pasa al mismo tiempo por dos superficies paralelas, con vehículo detenido al final de la huella, que baja(-) o sube(+) en vía con pendiente  $\theta$ .

Retomando el ejemplo de "atropello con víctima adelante", existe una ecuación que aplica para la solución del problema, y es la que se relaciona como Ecuación 3, que describe la distancia horizontal recorrida por el centro de

masa de una vara que se asume realiza el proceso de contacto, vuelo y arrastre cuando se le transfiere una velocidad  $V$  luego del atropello, en este instante se hace necesario interpretar correctamente las variables que en ella se plasman, para poder extraer de esta el valor de velocidad necesario para que el embestido pueda recorrer  $X$  como distancia mínima (que sería la separación vehículo-peatón en posición final), posteriormente conociendo el tipo de vehículo puede determinarse según estudios realizados, la relación de porcentaje de transferencia de velocidad por parte del vehículo que embiste ( $V_v$ ), ( $V = k * V_v$ ; siendo  $k = 60\%$  vehículos perfil bajo,  $70\%$  vehículos perfil medio y  $80-90\%$  vehículos frontales)(ii) ahora con ese valor y usando una ecuación de cinemática que relaciona velocidad con distancia y factor de frenado (Ecuación 4) se logra estimar el posible lugar de impacto a la vez que la posible velocidad de impacto, siendo estos factores relevantes en la RAT y la investigación integral del accidente.

Con estos ejemplos básicos se pretende ilustrar o hacer notar que es realmente necesario entender el modelo físico planteado y saber que es lo que verdaderamente se esta buscando, que se quiere extraer de las ecuaciones y que significan las variables, cuales son sus rangos y cuales las limitantes de aplicabilidad, porque el simple hecho de poseer cientos de ecuaciones no es la solución de un problema, las ecuaciones no trabajan por si solas, aun dentro de un software es necesario conocer los mencionados límites de aplicabilidad de esas ecuaciones, y plantear previamente un modelo físico del accidente para poder así interpretar los resultados obtenidos.

---

(i) Rudolf Limpert. Motor Vehicle Accident Reconstruction and Cause Analysis, page 550. Fifth Edition. Lexis Publishing.

(ii) Rudolf Limpert. Motor Vehicle Accident Reconstruction and Cause Analysis, Chapter 35. Fifth Edition. Lexis Publishing.

$$X = V t_c + V \sqrt{\frac{2h}{g}} + \frac{V^2}{2\mu g}$$

**Ecuación 3**

$$X = \frac{V_o^2 - V_f^2}{2\mu g}$$

**Ecuación 4**