

Estudio de la fuerza de impacto en escalada deportiva

Pseudónimo: Anko Barranco

Índice de contenidos

1. Introducción.....	3
2. La escalada como deporte.....	5
2.1. Material de seguridad.....	6
2.2. Tipos de seguros y reuniones.....	7
2.3. Tipos de roca.....	9
3. La física en la escalada.....	11
3.1. Fuerza de impacto.....	11
3.1.1. Módulo de Young.....	12
3.1.2. Factor de caída.....	12
4. Experimento previo: Investigación del alargamiento de la cuerda.....	14
4.1. Material.....	14
4.2. Procedimiento.....	14
4.3. Obtención de datos brutos y análisis.....	15
5. Cálculo de la fuerza de impacto.....	21
5.1. Material.....	22
5.2. Procedimiento.....	22
5.3. Obtención de datos brutos y análisis.....	23
6. Conclusiones.....	30
7. Webgrafía.....	32
7.1. Figuras.....	36
8. Anexos.....	38
8.1. Datos montaje 1-a.....	38
8.2. Datos montaje 1-b.....	39
8.3. Datos montaje 2-a.....	40
8.4. Datos montaje 2-b.....	42
8.5. Datos montaje 3-a.....	43
8.6. Datos montaje 3-b.....	45

1. Introducción

La escalada es una actividad que se ha practicado desde hace siglos, empezó siendo un entrenamiento para el montañismo ahora que la sociedad ha evolucionado, se trata de un deporte practicado por millones de personas alrededor del mundo.

Yo disfruto plenamente de esta actividad física. La empecé a practicar a los 4 años y la sigo practicando hoy en día. Al empezar tan pequeña, no era consciente de los riesgos que conllevaba realizar esta práctica, pero actualmente los conozco y asumo que puede haber accidentes, aunque tome medidas para evitarlos.

La escalada deportiva es considerada un deporte de riesgo debido a las caídas que pueden suceder durante la ascensión. Estas son frecuentes entre los practicantes del deporte y, en la mayoría de casos, el escalador no sufre ningún daño. Por otra parte, para practicar la escalada se debe tener una cierta noción de los conceptos básicos de seguridad, así como de sus elementos y como colocarlos correctamente. Por ejemplo, en el caso de las cintas *express*, es importante tener un mínimo conocimiento y variedad de las mismas para poder colocarlas con la longitud adecuada en el sitio adecuado, así reduciendo tanto el rozamiento con la cuerda, como la posibilidad de su abertura en el momento de la caída.

Este peligro casi no se toma en cuenta por la mayoría de escaladores, en muchos casos, he visto a practicantes noveles usando cintas demasiado cortas o desviándose de la vía para evitar secciones difíciles. Esto provoca un gran aumento en el rozamiento entre la cuerda y el material de seguridad o la roca. Además, está estrechamente relacionado con la gravedad de la caída; ya que, al haber menos cuerda útil que pueda amortiguar el impacto, el daño en la caída puede ser mayor para el escalador o el material.

De esta preocupación, surgió la idea de investigar las consecuencias de un mal uso del material de seguridad y la siguiente pregunta: ¿Cómo afecta el factor de caída a la fuerza de impacto en escalada deportiva?

El objetivo de esta investigación es encontrar la fuerza de impacto que recibe un sujeto en una caída controlada, escalando de primero, en una vía concreta de escalada deportiva. También, nos proponemos encontrar la relación entre el factor de caída y la fuerza de impacto para unas condiciones determinadas, es decir, usando la misma cuerda, la misma vía de escalada, el mismo escalador, etc. Además, compararemos la fuerza de impacto recibida dependiendo de si ha colocado unas cintas *express* de medida adecuada o no. Puesto que, si las cintas son demasiado cortas, la cuerda hará un recorrido poco lineal y el rozamiento será mayor, dando lugar a un factor de caída más elevado.

Por otra parte, se combinarán diferentes métodos para realizar el trabajo: Primeramente, encontraremos una parte explicativa, para entender los conceptos básicos de la escalada y la física que hay detrás de ella. Después habrá una parte experimental, formada por un experimento previo y una práctica, con las que ahondaremos en conceptos más específicos de la seguridad en escalada y de las que realizaremos un posterior análisis. Finalmente, habrá una parte comparativa entre los resultados de la parte práctica, para poder sacar unas conclusiones y responder a nuestra pregunta de investigación.

Cabe destacar que este trabajo tiene algunas limitaciones. Visto que, en una caída de escalada, intervienen muchos factores y variables difíciles de controlar, y al nivel al que estamos realizando el estudio, no los podemos tener todos en cuenta.

2. La escalada como deporte

La escalada es una actividad que consiste en trepar todo tipo de paredes con la fuerza física de uno mismo. Todo ascenso por una pared vertical, utilizando tanto las extremidades superiores como las inferiores, se considera escalada. Es por esto que hay diferentes variantes dependiendo de pequeñas modificaciones que puede tener la ascensión: escalada clásica, *psicobloc*, *bulder*, escalada en solo...

La escalada deportiva es una de estas modalidades y sus vías se caracterizan por estar equipadas con seguros para garantizar la seguridad del sujeto y componerse de un solo largo, ya que la altura de estas puede ir de los 12m, hasta los 40m (o más en casos excepcionales).

En cada vía, independientemente de su longitud total, hay unos seguros cada 2 metros, que permiten al escalador poner cintas *express* por donde posteriormente pasará la cuerda. Al final del recorrido, siempre hay una reunión desde donde realizar el descuelgue.

Por otra parte, el escalador puede realizar dos tipos de ascensos, de primero o de segundo:

En el ascenso de primero, el deportista va subiendo y, a medida que se encuentra cada seguro, pone las cintas *express* y pasa la cuerda. Cuando llega a la reunión, hace una maniobra para poder pasar la cuerda sin necesidad de cintas y realiza el descuelgue. Finalmente, mientras va descendiendo, recupera las cintas para que no se pierda nada de material.

En el ascenso de segundo, la cuerda ya está pasada por la reunión y el escalador solo debe preocuparse de subir y, si aún no se han quitado las cintas *express*, retirarlas en el descenso.

2.1. Material de seguridad

Cuerda

Hay diferentes tipos de cuerdas para realizar actividades de montañismo: estáticas, *semiestáticas*, dinámicas, dobles...

En escalada deportiva, se utiliza la cuerda dinámica simple, que está fabricada para absorber la mayor energía posible en el caso de caídas durante la ascensión, cosa que ocurre con frecuencia, sobre todo en escaladores experimentados.

La cuerda se compone de dos partes: el núcleo y la funda. El núcleo es la parte interior de la cuerda, consiste de miles de hilos trenzados entre sí y provee un 65-85% de la resistencia de la cuerda. Por otra parte, la funda es la parte externa encargada de proteger de roces y aporta un 15-35% de su resistencia. Puede soportar hasta 12 kN.



Figura 1. Cuerda de escalada

Arnés



Figura 2. Arnés de escalada tipo C.

El más usado en escalada es el tipo C, aquel que sujeta al individuo por la zona de la cintura y se conecta a unas perneras, manteniendo así el cuerpo en posición sentada. Se une a la cuerda por el anillo ventral (punto en el que el escalador se puede encordar), donde recae toda la fuerza y desgaste de las caídas. Puede soportar hasta 15 kN.

Asegurador

Es el componente que permite al asegurador controlar la cuerda con facilidad para así garantizar la seguridad del escalador.

El más usado es el "Petzl GriGri", un asegurador de frenado activo, es decir, este se bloquea automáticamente cuando la cuerda va muy rápido (como en una caída), de forma parecida a como lo haría un cinturón de seguridad.



Figura 3. Asegurador "Petzl GriGri"

Mosquetón de seguridad



Se trata de una anilla metálica con una pieza móvil (gozne) para poder abrirlo. Su particularidad es que el gozne cuenta con un seguro, que permite dejarlo cerrado asegurando que no pueda haber accidentes.

Figura 4. Mosquetón de seguridad

Se usan, sobre todo, en el momento de pasar la cuerda por el descuelgue y para enganchar el asegurador al arnés.

Pueden soportar hasta 26 kN, en vertical; 9 kN, en horizontal; y 10 kN, con el cierre abierto.

Cintas express

Es el elemento que nos permite enganchar la cuerda a los seguros. Están compuestas por un mosquetón recto (que se ancla al seguro) unido por una cinta textil a un mosquetón curvo (por el que se pasa la cuerda). Pueden soportar hasta 22 kN en condiciones óptimas.



Figura 5. Cintas express de diferentes longitudes

2.2. Tipos de seguros y reuniones

Los seguros son lo que le permite al escalador enganchar las cintas a la pared. Aunque son muy parecidos, hay diferentes tipos.

Espits

Son los primeros anclajes utilizados y se clavaban con martillo. Aunque no se sigue equipando con ellos y actualmente se están reemplazando por otras opciones más seguras, aún se pueden encontrar en vías antiguas. Resisten una fuerza de hasta 18 kN.



Figura 6. Espit colocado en roca

Parabolts



Figura 7. Parabolts colocado en roca.
[Fuente propia]

Son los anclajes más usados, se hace un hueco con taladro en la pared y se introduce el *parabolts*, que cuenta con una parte que se expande dentro del agujero. Resisten una fuerza de hasta 25 kN.

Químicos

Son los más seguros de todos, ya que no se expanden dentro de la roca, dañándola menos. Resisten una fuerza de hasta 50 kN.



Figura 8. Químico colocado en roca

Asimismo, las reuniones están colocadas al final de cada vía y nos permiten realizar el descuelgue. Hay diferentes tipos dependiendo de sus componentes:

- Reunión de dos *parabolts* con una argolla cada uno (la argolla es necesaria, ya que no se puede pasar la cuerda por un *parabolts* porque, por el roce, la desgastaría mucho). Pueden resistir, tanto el *parabolts* como la argolla, hasta 25 kN.

- Reunión de dos químicos (en estos sí se puede pasar directamente la cuerda). Puede resistir hasta 50 kN, aunque no es muy usada debido a que es difícil realizar el descuelgue con ella.

- Reunión de dos *parabolts* en vertical, uno con cadena, y esta, unida al otro *parabolts* por una argolla (como vemos en la figura 9). Si está bien equilibrada, reparte equitativamente las cargas entre los dos *parabolts*. Puede soportar hasta 25 kN.



Figura 6. Espit colocado en roca

- Reunión triangulada: Formada por dos *parabolts*, cada uno con una cadena unidas por una argolla, y otra argolla unida a esta, formando un triángulo (como vemos en la figura 10). Busca repartir el peso entre los dos *parabolts* equitativamente, por lo que deben estar colocados formando un ángulo de hasta

60° entre ellos y las argollas. En caso contrario, el peso se repartiría mal y provocaría un desgaste excesivo, así como menos durabilidad. Puede soportar hasta 25 kN.



Figura 10. Reunión triangulada

2.3. Tipos de roca

Aunque los factores de seguridad en escalada deportiva no dependen del tipo de roca, estas se deben tener en cuenta, ya que influirán en el rozamiento de la cuerda:

Roca caliza

Es un tipo de roca formada principalmente por un 80% de carbonato cálcico y un 20% de materiales detríticos (aunque los porcentajes pueden variar según la zona de formación). Consecuentemente, tiene una gran porosidad y es considerada una roca blanda, por lo que el rozamiento con la cuerda suele ser menor en estas vías.

Algunos sitios conocidos de escalada en roca caliza son la Garganta del Verdón (Francia), Tufa City (EUA), Kalymnos (Grecia)...

Granito

Es una roca formada principalmente por mica, cuarzo y feldespato. Debido a contener una gran cantidad de cuarzo, tiene una dureza y resistencia muy elevada, comparado con el resto de piedras naturales. Esto se traduce en un mayor rozamiento.

Algunos sitios conocidos de escalada en granito son La Pedriza (España), Yosemite (EUA), Columbia Británica (Canadá)...

Pizarra

Se trata de una roca metamórfica formada por la compactación de arcillas. Está dividida en hojas o lajas planas y tiene un grano fino. Por ende, podemos deducir que el rozamiento entre la cuerda y este tipo de roca no será especialmente

elevado.

Algunos sitios conocidos de escalada en pizarra son Llanbers Slate (Reino Unido), Cathedral Quarry (Reino Unido), Hodge Close (Reino Unido)...

Arenisca

La arenisca es una roca sedimentaria formada por fragmentos de cuarzo, mica y feldespatos. Tiene una gran porosidad y dureza elevada. Por otra parte, su grano depende de su composición, que es bastante variable. Pero podemos decir, que cuanto mayor sea su grano, mayor será el rozamiento.

Algunos sitios conocidos de escalada en arenisca son Moab (EUA), Bohemian Paradise (República Checa), Torina (España)...

3. La física en la escalada

Cuando se produce una caída en escalada, tienen lugar distintos sucesos:

Si negligimos la fricción, justo antes de la caída, la energía total del escalador es potencial gravitatoria, ya que no hay velocidad (bola 1 de la figura 11). Seguidamente, el escalador empieza a descender, por lo que el total de energía mecánica corresponde a la energía cinética, que va aumentando a medida que el escalador desciende, y a la energía potencial gravitatoria, que va disminuyendo (bola 2 de

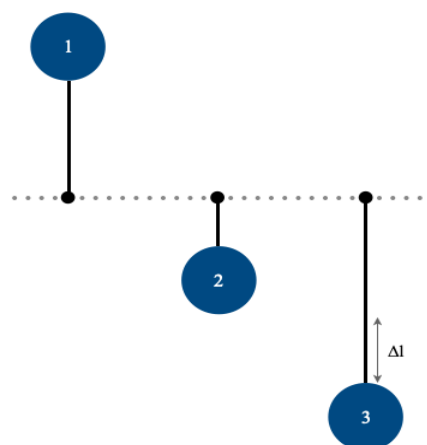


Figura 1. Simplificación caída en escalada. [Fuente propia]

la figura 11). Finalmente, en el instante en que el escalador recibe el impacto, la energía mecánica corresponde a la energía cinética, la energía potencial gravitatoria y la energía potencial elástica, ya que la cuerda sufre un alargamiento que disipa una parte de la energía (bola 3 de la figura 11).

Si tenemos esto en cuenta y que el incremento de energía mecánica cuando intervienen fuerzas conservativas es nulo, podemos expresar este suceso de la siguiente manera:

Fórmula 1

$$\Delta Em = 0 \quad \Rightarrow \quad Em_3 = Em_1$$

$$\Rightarrow \quad Epg_3 + Ec_3 + Epe_3 = Epg_1$$

Em: energía mecánica (J)
Epg: energía potencial gravitatoria (J)
Ec: energía cinética (J)
Epe: energía potencial elástica (J)

3.1. Fuerza de impacto

La fuerza de impacto es la fuerza que recibe el escalador en una caída, así como la última cinta por la que ha pasado la cuerda, es decir, desde la que cae.

Esta fuerza de impacto se puede calcular mediante la siguiente fórmula, que ha sido verificada y contrastada por diferentes fuentes expertas:

Fórmula 2

$$F_I = m \cdot g + m \cdot g \sqrt{1 + \frac{2 \cdot E \cdot S \cdot F_c}{m \cdot g}}$$

F_I: fuerza de impacto (N)
m: masa del escalador (kg)
g: aceleración de la gravedad en la tierra (9,81 m/s²)
S: sección de la cuerda (m²)
E: módulo de Young (Pa)
F_c: factor de caída (magnitud adimensional)

3.1.1. Módulo de Young

Para amortiguar el impacto se utilizan cuerdas dinámicas. Estas cuerdas son elásticas y al estirarse disipan una parte de la energía de la caída en forma de energía potencial elástica. La magnitud que nos da información sobre el comportamiento de un material elástico cuando se le aplica una fuerza en una determinada dirección es el módulo de Young, y se encuentra de la siguiente manera:

Fórmula 3

$$E = \frac{\sigma}{\epsilon}$$

E: Módulo de Young (Pa)
σ: esfuerzo (Pa)
ε: deformación (magnitud adimensional)

Por otra parte, el esfuerzo es el cociente entre la fuerza perpendicular a la sección de cuerda y la sección transversal:

Fórmula 4

$$\sigma = \frac{F}{S}$$

σ: esfuerzo (Pa)
F: fuerza perpendicular a la sección de cuerda (N)
S: sección transversal (m²)

Y la deformación se encuentra realizando el cociente entre el incremento de la longitud del material (Δl), en este caso la cuerda, y su longitud inicial (l_0):

Fórmula 5

$$\epsilon = \frac{\Delta l}{l_0}$$

ε: deformación (magnitud adimensional)
Δl: incremento de longitud (m)
l₀: longitud inicial (m)

3.1.2. Factor de caída

El factor de caída cuantifica la gravedad de una caída en escalada. Se calcula realizando el cociente entre la altura de la caída y la longitud de cuerda y suele dar valores entre 0 y 2.

¹Fórmula 2: Soriano J. C. (2015). Fuerza choque caída. Recuperado 17 mayo de 2022, de <https://www.slideshare.net/joaquincsoriano/fuerza-choque-caida-44109479>

Hay dos tipos de factor de caída: el teórico y el real. Se diferencian en que en el teórico no tenemos en cuenta el rozamiento de la cuerda con la roca y las cintas, en cambio, en el real esto sí se contempla. Se tiene en cuenta solo la longitud de cuerda útil para la caída, aquella que realmente trabaja y sufre un menor rozamiento. Por ende, para una misma caída, el factor teórico es más pequeño que el real, es decir, la gravedad real de la caída es más elevada que la teórica, ya que en ella interviene menos cuerda capaz de absorber la fuerza de impacto.

Podemos calcular el factor de caída teórico (F_{ct}), mediante la siguiente fórmula:

Fórmula 6

$$F_{ct} = \frac{\Delta h}{l}$$

F_{ct} : factor de caída teórico (magnitud adimensional)
 Δh : distancia vertical recorrida durante la caída (m)
 l : longitud total de cuerda (m)

Asimismo, el factor de caída real (F_{cr}) se calcularía:

Fórmula 7

$$F_{cr} = \frac{\Delta h}{l_u}$$

F_{cr} : factor de caída real (magnitud adimensional)
 Δh : distancia vertical recorrida durante la caída (m)
 l_u : longitud útil de cuerda (m)

4. Experimento previo: Investigación del alargamiento de la cuerda

Para poder encontrar la fuerza de choque de una caída en escalada deportiva, es necesario conocer el módulo de Young de la cuerda que se utiliza para asegurar al escalador (fórmula 3).

El objetivo de este experimento es encontrar el módulo de Young de una cuerda en concreto, para posteriormente calcular la fuerza de choque en diferentes caídas realizadas con esta misma cuerda.

Cogeremos como variable independiente las masas que colgamos (m) y como variable dependiente el alargamiento de la cuerda (Δl). Por otra parte, como variables controladas tenemos: la aceleración de la gravedad ($9,81 \text{ m/s}^2$), el perímetro de la cuerda ($0,037 \text{ m}$), la longitud de cuerda sin estirarse ($4,93 \text{ m}$), y las condiciones ambientales que, como realizamos la experiencia en un periodo de tiempo muy corto, no variaron.

4.1. Material

- Cuerda dinámica
- Masas de diversos pesos
- Mosquetones
- Bagas de anclaje
- Cinta métrica ($\pm 0,1 \text{ cm}$)
- Vara de madera
- Báscula ($\pm 0,01 \text{ kg}$)



Figura 12. Cuerda sin pesos [Fuente propia]

4.2. Procedimiento

Primero, realizamos el montaje:

1. Medimos el perímetro de la cuerda.

2. Colgamos la cuerda de un punto elevado, nosotros a $(4,930 \pm 0,001 \text{ m})$ de altura.

3. Hacemos un nudo en la parte baja de la cuerda para poder colgar los pesos, dejando un espacio de alrededor de un metro, pues la cuerda se estirará.

4. Marcamos con una vara de madera la altura a la que se encuentra la cuerda, así tenemos la posición inicial y podemos medir directamente el alargamiento.



Figura 13. Alargamiento de la cuerda con masa 2kg. [Fuente propia]

5. Colgamos los pesos con las bagas y los mosquetones.

6. Medimos el incremento de longitud de la cuerda, es decir, desde la vara de madera, con la que marcamos el punto inicial de la cuerda, hasta el nudo, que ha descendido al colocarle los pesos.

7. Repetimos el procedimiento con diferentes masas.

Cabe destacar, que es importante colocar con cuidado las masas, ya que son bastante elevadas y, en el caso de caer sobre nosotros, nos harían daño.

4.3. *Obtención de datos brutos y análisis*

Al realizar el experimento, parece que el incremento del alargamiento con respecto a la masa es directamente proporcional.

Además, al quitar los pesos después de que la cuerda se haya estirado, vemos como vuelve a su posición inicial. Aunque con los de masa más elevada le cuesta más, ya que hay un incremento de longitud mayor.

Asimismo, hemos obtenido los siguientes datos brutos:

Perímetro de cuerda: $(3,7 \pm 0,1) \text{ cm}$

Masa (kg)	Δm (kg)	Alargamiento ($\pm 0,1$ cm)
2,04	0,01	3,0
4,06	0,02	7,0
8,15	0,04	14,0
12,07	0,03	20,0
20,03	0,01	27,0
24,09	0,03	32,0
28,18	0,05	38,5
32,10	0,04	41,0
53,23	0,01	58,0

Tabla 1. Tabla de datos brutos del experimento previo

Las incertidumbres corresponden a la mínima medida de los instrumentos usados. En el caso del alargamiento, una cinta métrica con sensibilidad $\pm 0,1$ cm. En el caso de la masa, hemos usado una báscula electrónica con sensibilidad $\pm 0,01$ kg. Asimismo, en las masas su incertidumbre corresponde a la suma de las absolutas, ya que acumulamos error.

Seguidamente, convertimos las unidades al Sistema Internacional mediante factores de conversión, para poder calcular el esfuerzo y la deformación para cada muestra. Esto nos permite elaborar una gráfica, cuyo pendiente es el módulo de Young.

Cálculo del esfuerzo

Necesitamos la fuerza aplicada (peso de las masas) y el área transversal de la cuerda.

1. Conociendo la fórmula del perímetro de la circunferencia, calculamos el radio:

$$P = 2 \cdot \pi \cdot r \quad \Rightarrow \quad r = \frac{0,037 \text{ m}}{2 \cdot \pi} = 5,9 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

Calculamos su incertidumbre, en la que consideramos el número pi y el dos constantes:

$$\Delta r = \frac{\Delta P}{P} \cdot r \quad \Rightarrow \quad \Delta r = \frac{0,001}{0,037} \cdot 5,9 \cdot 10^{-3} = \pm 0,2 \cdot 10^{-3} \text{ m}$$

2. Con el radio y la fórmula del área de la circunferencia, calculamos el área transversal de la cuerda:

$$A = \pi \cdot r^2 \Rightarrow A = \pi \cdot (5,9 \cdot 10^{-3} \text{ m})^2 = 1,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

Y su incertidumbre, en la que consideramos el número pi como constante y multiplicamos la incertidumbre relativa del radio por dos, ya que lo encontramos elevado al cuadrado:

$$\Delta A = 2 \cdot \frac{\Delta r}{r} \cdot A \Rightarrow \Delta A = 2 \cdot \frac{0,2 \cdot 10^{-3}}{5,9 \cdot 10^{-3}} \cdot 1,1 \cdot 10^{-4} = \pm 0,1 \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$$

3. Calculamos la fuerza aplicada, que corresponde al peso de las masas (P). Este se encuentra multiplicando la masa (m) por la aceleración de la gravedad ($g=9,81 \text{ m/s}^2$):

$$P = m \cdot g$$

4. Dividimos la fuerza entre el área para encontrar el esfuerzo (fórmula 4).

Consecuentemente, obtenemos la siguiente tabla:

Masa (kg)	Δm (kg)	Fuerza (N)	ΔF (N)	Esfuerzo (Pa)	Δ Esfuerzo (Pa)
2,04	0,01	20,0	0,1	$1,82 \cdot 10^5$	$0,25 \cdot 10^5$
4,06	0,02	39,8	0,2	$3,62 \cdot 10^5$	$0,41 \cdot 10^5$
8,15	0,04	80,0	0,4	$7,26 \cdot 10^5$	$0,73 \cdot 10^5$
12,07	0,03	118	1	$1,08 \cdot 10^6$	$0,10 \cdot 10^6$
20,03	0,01	196	1	$1,79 \cdot 10^6$	$0,17 \cdot 10^6$
24,09	0,03	236	1	$2,15 \cdot 10^6$	$0,20 \cdot 10^6$
28,18	0,05	276	1	$2,51 \cdot 10^6$	$0,23 \cdot 10^6$
32,10	0,04	315	1	$2,86 \cdot 10^6$	$0,27 \cdot 10^6$
53,23	0,01	522	1	$4,75 \cdot 10^6$	$0,44 \cdot 10^6$

Tabla 2. Tabla del cálculo de la fuerza y el esfuerzo

Por otra parte, encontramos la incertidumbre de la fuerza mediante incertidumbres relativas y considerando que la gravedad es una constante:

$$\Delta P = \frac{\Delta m}{m} \cdot P$$

La incertidumbre del esfuerzo la encontramos mediante incertidumbres relativas:

$$\Delta \sigma = \left(\frac{\Delta P}{P} + \frac{\Delta A}{A} \right) \cdot \sigma$$

Cálculo de la deformación

Para calcular la deformación, necesitamos el incremento de longitud y la longitud inicial de cuerda.

Pasamos las medidas tomadas al SI y dividimos el incremento de longitud entre la longitud inicial (fórmula 5):

$$\varepsilon = \frac{\Delta l}{l} \Rightarrow \varepsilon = \frac{\Delta l}{4,93 m}$$

Alargamiento ($\pm 0,001 m$)	Deformación (adimensional)	ΔDeformación (adimensional)
0,030	0,0061	0,0002
0,070	0,0142	0,0002
0,140	0,0284	0,0003
0,200	0,0406	0,0003
0,270	0,0548	0,0003
0,320	0,0649	0,0003
0,385	0,0781	0,0004
0,410	0,0832	0,0004
0,580	0,118	0,001

Tabla 3. Tabla del cálculo de la deformación

Asimismo, calculamos su incertidumbre mediante incertidumbres relativas en todos los casos:

$$\Delta \varepsilon = \left(\frac{\Delta \Delta l}{\Delta l} + \frac{\Delta l}{l} \right) \cdot \varepsilon$$

Y, obtenemos la siguiente tabla:

Esfuerzo (Pa)	ΔEsfuerzo (Pa)	Deformación (adimensional)	ΔDeformación (adimensional)
$1,82 \cdot 10^5$	$0,25 \cdot 10^5$	0,0061	0,0002
$3,62 \cdot 10^5$	$0,41 \cdot 10^5$	0,0142	0,0002

$7,26 \cdot 10^5$	$0,73 \cdot 10^5$	0,0284	0,0003
$1,08 \cdot 10^6$	$0,10 \cdot 10^6$	0,0406	0,0003
$1,79 \cdot 10^6$	$0,17 \cdot 10^6$	0,0548	0,0003
$2,15 \cdot 10^6$	$0,20 \cdot 10^6$	0,0649	0,0003
$2,51 \cdot 10^6$	$0,23 \cdot 10^6$	0,0781	0,0004
$2,86 \cdot 10^6$	$0,27 \cdot 10^6$	0,0832	0,0004
$4,75 \cdot 10^6$	$0,44 \cdot 10^6$	0,118	0,001

Tabla 4. Tabla de datos procesados

Finalmente, con los datos obtenidos elaboramos la siguiente gráfica, que nos sirve para obtener el módulo de Young a partir de la pendiente:

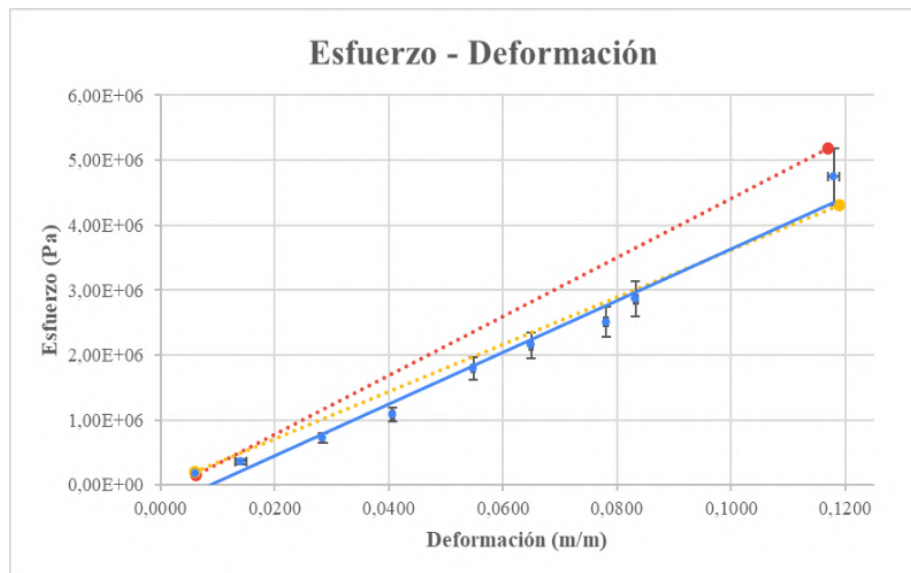


Figura 14. Gráfica Esfuerzo – Deformación [Fuente propia]

Observamos la línea de tendencia (en azul) y vemos que los valores medidos son próximos a esta, lo cual significa que son relativamente precisos. También aparecen el pendiente máximo (en rojo) y el pendiente mínimo (en amarillo).

A partir de la gráfica obtenemos la pendiente, que será el valor del módulo de Young, con la siguiente fórmula:

$$m = \frac{\Delta y}{\Delta x}$$

Asimismo, calculamos su incertidumbre restando a la pendiente (m), la máxima (m_1) y la mínima (m_2) y cogiendo el mayor valor:

$$m_1 = \frac{5,19 \cdot 10^6 - 1,57 \cdot 10^5}{0,117 - 0,0062} = 4,54 \cdot 10^7 Pa$$

$$m_2 = \frac{4,31 \cdot 10^6 - 2,07 \cdot 10^5}{0,119 - 0,0060} = 3,63 \cdot 10^7 Pa$$

$$m = \frac{4,75 \cdot 10^6 - 1,82 \cdot 10^5}{0,118 - 0,0061} = (4,08 \pm 0,46) \cdot 10^7 Pa$$

Finalmente, el módulo de Young de la cuerda es de $(4,08 \pm 0,46) \cdot 10^7 Pa$.

5. Cálculo de la fuerza de impacto

La fuerza de impacto corresponde a los newtons de fuerza que recibe el escalador en una caída. Como hemos mencionado anteriormente, se puede encontrar de la siguiente manera (fórmula 2):

$$F_I = m \cdot g + m \cdot g \sqrt{1 + \frac{2 \cdot E \cdot S \cdot F_C}{m \cdot g}}$$

En cuanto a las variables, tomaremos como independiente el factor de caída y como dependiente la fuerza de impacto. Asimismo, tenemos distintas variables controladas: la masa del escalador, el módulo de Young de la cuerda (calculado en el apartado 4), la sección de cuerda, la gravedad, el tipo de roca (granito), y las condiciones ambientales que, aunque realizamos las experiencias en dos días distintos, no se detecta una variación destacable en ellas.

Por otra parte, realizaremos diferentes pruebas para que el factor de caída sea distinto en cada una de ellas. Compararemos la fuerza teórica con diferentes factores de caída y buscaremos su coeficiente de correlación, para así ver como de estrecha es su relación. Además, calcularemos la fuerza de caída real para distintos montajes de la vía. Los diferentes montajes darán como resultado más o menos fricción de la cuerda con la roca y las cintas, hecho que hará que una mayor o menor cantidad de la cuerda sea útil y pueda disipar parte de la energía. Así veremos si la fricción condiciona destacablemente la fuerza de impacto real.

Asimismo, trabajaremos en un entorno de granito, por lo que el rozamiento será mayor que en otras rocas.

También, cabe destacar que hemos tomado diferentes medidas de seguridad. Se han utilizado protecciones y se ha escogido una vía en la que no haya peligro de chocar contra un saliente de roca o árbol. Además, las caídas son de una gravedad relativamente baja, para no comprometer la integridad del escalador.

5.1. Material

- Cuerda dinámica
- Cintas *express*
- Arnés
- Bagas de anclaje
- Asegurador
- Mosquetones de seguridad
- Cámara
- Cinta métrica ($\pm 0,1\text{ cm}$)
- Cinta adhesiva
- Báscula ($\pm 0,01\text{ kg}$)
- Ordenador con programa *Tracker* (versión 5.1.5)

5.2. Procedimiento

1. Medimos las variables controladas que necesitamos para los cálculos: el perímetro de la cuerda y la masa del escalador.
2. Montamos la vía hasta el penúltimo seguro (para tener más altura y asegurar que el escalador no se haga daño al caer) y ponemos un mosquetón de seguridad con una boga en el siguiente seguro para ayudarnos a subir.
3. Ponemos la cámara a grabar de forma frontal.
4. Realizamos la caída.
5. Hacemos una marca con la cinta adhesiva en la parte de la cuerda que sale del asegurador.
6. Bajamos al escalador y desmontamos la vía. Medimos la cuerda desde la marca hecha con la cinta hasta el nudo del escalador para obtener la longitud total de la cuerda.
7. Repetimos el procedimiento dos veces en cada montaje: en la primera caída (a) con una altura inferior a la segunda (b).

Asimismo, hemos hecho 3 montajes diferentes: el primero con las cintas más cortas, para que así haya más rozamiento; el segundo, cambiando un par de

cintas para reducirlo; y el tercero, intentando que la cuerda tome la forma más lineal posible y reduciendo el rozamiento al mínimo.

Cabe mencionar que la parte práctica se ha llevado a cabo en dos días distintos, de forma que al repetirla, se puedan obtener unos resultados más fiables.

8. Cargamos el vídeo en el programa “Tracker”.

9. Calibramos el vídeo (figura 19) y realizamos un seguimiento de la caída. El programa nos muestra gráficas con diferentes valores para cada fotograma, como la altura, la velocidad, la aceleración, etc.² Nosotros lo usamos para calcular la altura de la caída y tomar las medidas de la cuerda útil.

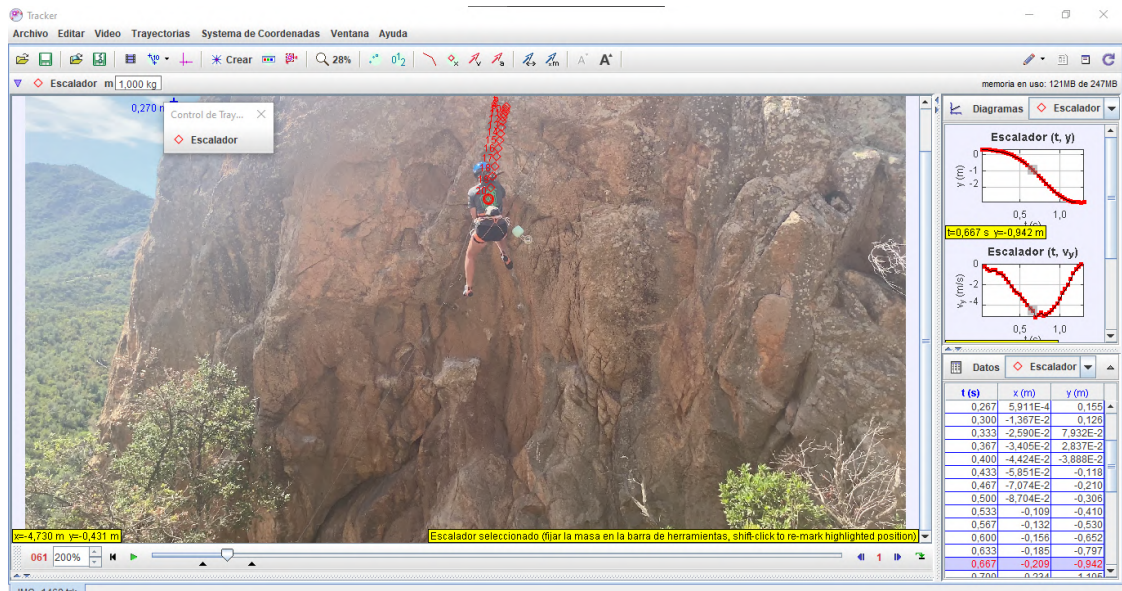


Figura 15. Análisis de vídeo con el programa Tracker [Fuente propia]

5.3. Obtención de datos brutos y análisis

De forma cualitativa, destaca la reducción del rozamiento al cambiar las cintas cortas por otras más largas. Asimismo, las caídas han sido de una gravedad relativamente baja, por lo que no ha habido un desgaste excesivo del material o la cuerda. Además, se ha buscado partir desde una misma altura en todas las pruebas.

Además, hemos obtenido los siguientes datos:

²Las tablas de datos para cada caída y sus respectivas gráficas se encuentran en los anexos.

Montaje	altura caída - Δh ($\pm 0,01$ m)	longitud cuerda - l ($\pm 0,01$ m)
1 - a	2,68	14,39
1 - b	3,49	14,67
2 - a	3,40	14,78
2 - b	4,69	15,22
3 - a	3,89	14,83
3 - b	5,01	15,31

Tabla 5. Tabla de datos brutos para el cálculo de la fuerza de impacto

También, contamos con otros datos calculados en el apartado 4:

Masa del escalador con el equipo: $(65,42 \pm 0,01) \text{ kg}$

Sección transversal de cuerda: $(1,1 \pm 0,1) \cdot 10^{-4} \text{ m}^2$

Módulo de Young: $(4,08 \pm 0,46) \cdot 10^7 \text{ Pa}$

Cabe mencionar que la incertidumbre para la altura de la caída corresponde a la sensibilidad de la cinta métrica usada para medir la cuerda y la cinta *express* con la que calibramos el vídeo.

Seguidamente, calculamos la fuerza de impacto, que tendrá el mismo procedimiento para los valores teóricos que los reales.

1. Calculamos el factor de caída de cada una de las pruebas, mediante la siguiente fórmula:

$$F_c = \frac{\Delta h}{l}$$

Y calculamos su incertidumbre a partir de las relativas:

$$\Delta F_c = \left(\frac{\Delta \Delta h}{\Delta h} + \frac{\Delta l}{l} \right) \cdot F_c$$

2. Sustituimos los factores de caída en la fórmula 2 para obtener la fuerza de impacto. Su incertidumbre la calculamos por partes, ya que la fórmula es un poco más:

$$F_I = m \cdot g + m \cdot g \sqrt{1 + \frac{2 \cdot E \cdot S \cdot F_c}{m \cdot g}}$$

Hacemos un cambio de variable (X e Y), pues las incertidumbres de las multiplicaciones se encuentran con las relativas y las de la suma con absolutas. Además, consideramos la gravedad, el 1 y el 2 constantes.

Primero, calculamos la incertidumbre de X:

$$X = m \cdot g \Rightarrow \frac{\Delta X}{X} = \frac{\Delta m}{m} \Rightarrow \Delta X = \frac{\Delta m}{m} \cdot X$$

Seguidamente, la incertidumbre de Y:

$$Y = m \cdot g \sqrt{1 + \frac{2 \cdot E \cdot S \cdot F_c}{m \cdot g}} \Rightarrow Y = m \cdot \sqrt{\frac{E \cdot S \cdot F_c}{m}} \Rightarrow$$

$$\frac{\Delta Y}{Y} = \frac{\Delta m}{m} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta E}{E} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta F_c}{F_c} + \frac{\Delta m}{m} \right) \Rightarrow$$

$$\Delta Y = Y \cdot \left[\frac{\Delta m}{m} + \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta E}{E} + \frac{\Delta S}{S} + \frac{\Delta F_c}{F_c} + \frac{\Delta m}{m} \right) \right]$$

Finalmente, sumamos las incertidumbres absolutas:

$$\Delta F_i = \Delta X + \Delta Y$$

Mediante estos cálculos, obtenemos los valores teóricos y reales:

Valores teóricos

Caída	Factor caída teórico - $F_{ct} (\pm 0,01)$	Fuerza impacto teórica - $F_{it} (N)$	$\Delta F_{it} (N)$
1 - a	0,19	1862	266
1 - b	0,24	1978	271
2 - a	0,23	1961	271
2 - b	0,31	2122	281
3 - a	0,26	2030	275
3 - b	0,33	2159	284

Tabla 6. Tabla de datos procesados teóricos

Con los datos de la tabla 6 obtenemos la siguiente gráfica:

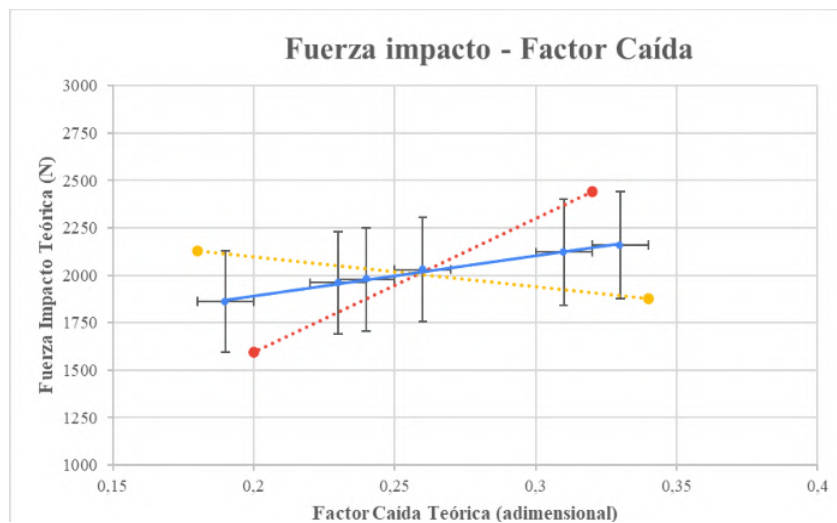


Figura 16. Gráfica Fuerza Impacto Teórica – Factor Caída Teórico [Fuente propia]

Vemos la línea de tendencia (en azul) y las líneas de máximo (rojo) y mínimo pendiente (amarillo). Sus incertidumbres pueden parecer elevadas, pero ninguna supera el 15%. Esto sucede porque la gráfica empieza en el punto (1000, 0,15) y las incertidumbres se ven ampliadas.

Cabe mencionar que hemos hecho una aproximación a una recta, porque aunque partimos de una función irracional (fórmula 2), estamos trabajando con un rango de datos muy pequeño. Además, la aplicación usada para realizar la gráfica (Excel, versión 18.0) nos da el coeficiente de correlación de Pearson (medida que cuantifica la correlación entre dos variables). Vemos que es de 0,998, indicando que hay una relación muy fuerte entre nuestras variables.

También, obtenemos la ecuación de la recta, que cuantifica el aumento de la fuerza de impacto teórica respecto al factor de caída teórica.

$$y=2096 x+1474$$

Esta ecuación nos indica la pendiente de la recta (término que acompaña a la “x”) y la ordenada al origen (término independiente). Cabe destacar que esta aproximación lineal solo nos sirve para valores que estén dentro de nuestro rango de datos, dado que partimos de una función irracional (con una raíz

cuadrada).

Valores reales

Encontramos los valores para la fuerza de impacto real. Cabe destacar que hemos determinado la longitud de cuerda útil tomando la medida a partir de la cinta donde vemos que hay un rozamiento más elevado. Así encontramos de una manera aproximada la cantidad de cuerda que realmente sufre una elongación.

Caída	Longitud cuerda útil - l ($\pm 0,01\text{m}$)	Factor caída real - F_{cr} ($\pm 0,01$)	Fuerza impacto real - F_{ir} (N)	ΔF_{ir} (N)
1 - a	4,58	0,59	2589	322
1 - b	4,60	0,76	2831	348
2 - a	7,62	0,45	2370	302
2 - b	8,25	0,57	2564	321
3 - a	13,05	0,30	2102	280
3 - b	13,23	0,38	2254	292

Tabla 7. Tabla de datos procesados reales

Podemos observar como los montajes 1, con rozamiento más elevado, también tienen una fuerza de impacto real más alta.

Esto lo cuantificamos calculando el porcentaje en que ha disminuido la fuerza de impacto real respecto a 1 para cada tipo de caída (*a* o *b*). Igualmente, calculamos *a* y *b* separados, porque intentamos que las alturas de caída sean menores en *a* que en *b*. Por tanto, las caídas tipo *a* son similares entre ellas y lo mismo ocurre con las del tipo *b*.

Montaje	Disminución de la fuerza de impacto respecto a 1 en caídas del tipo a	Disminución de la fuerza de impacto respecto a 1 en caídas del tipo b
1	0 %	0,00 %
2	8,46 %	9,43 %
3	18,81 %	20,38 %

Tabla 8. Tabla del porcentaje de disminución de la fuerza de impacto real respecto al montaje 1

A partir de la tabla 8, vemos como a medida que se reduce la fricción que sufre la cuerda, también se reduce la fuerza de impacto. Disminuye hasta en un 20,38%, colocando las cintas de forma óptima (montaje 3-b). Conviene subrayar, que los

valores de las caídas tipo *a* y tipo *b* son bastante similares, pero no iguales, visto que han sido realizadas experimentalmente y no se ha podido replicar un aumento del factor de caída exactamente igual para las dos.

Asimismo, obtenemos la gráfica para los datos reales, en la que podemos ver la línea de tendencia (en azul) y las líneas de máximo (rojo) y mínimo pendiente (amarillo). Con relación a las incertidumbres, parecen grandes, debido a que la gráfica empieza en el punto (1500, 0,25), más ninguna supera el 14%.

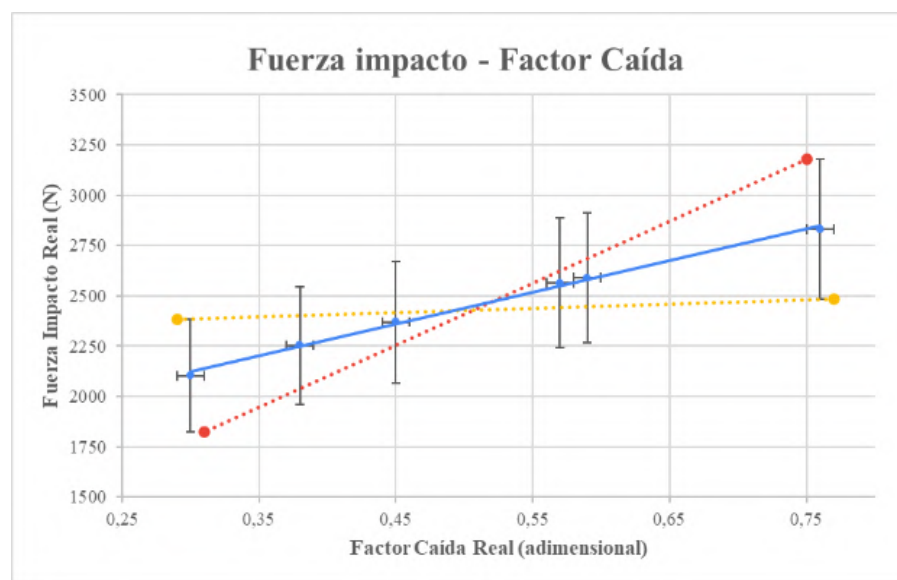


Figura 17. Gráfica Fuerza Impacto Real – Factor Caída Real [Fuente propia]

Obtenemos el coeficiente de correlación de Pearson de los datos reales, que nos da 0,998, mostrando que entre estos valores hay una correlación muy fuerte.

Consecuentemente, la ecuación de la recta es:

$$y = 1584x + 1648$$

Podemos ver que en los valores reales, la pendiente es 1584 y el punto por el que la función corta el eje de ordenadas es (0, 1648).

Comparación de los valores teóricos y reales

Finalmente, podemos comparar de forma general los datos teóricos con los reales a partir de las pendientes de las rectas. En los valores teóricos, la pendiente es, 2096, y en los reales, 1584. Esto nos muestra que en los datos teóricos hay un mayor incremento en la fuerza de impacto que en los reales, que es un 24,47% inferior.

Esto sucede porque, debido a que en los valores reales tenemos en cuenta que no toda la cuerda es útil, obtenemos valores para el factor de caída real más elevados. Asimismo, trabajamos en inicio con una función irracional, que cuando es más próxima a cero tiene una pendiente mayor y lentamente se va reduciendo. Debido a esto, como los datos teóricos son más próximos a cero, tendrán una pendiente mayor que los reales.

De esta manera se explica que las gráficas tengan pendientes diferentes y que el pendiente de los valores reales sea inferior al de los teóricos.

6. Conclusiones

En inicio nos planteamos investigar cómo afecta el factor de caída a la fuerza de impacto en escalada deportiva. Mediante el estudio realizado y los datos obtenidos a partir de la parte práctica, podemos decir que hemos cumplido los objetivos propuestos:

Por una parte, hemos determinado la fuerza de impacto para todas las caídas. Esto lo hemos hecho, primero, calculando el módulo de Young de la cuerda utilizada y, posteriormente, encontrando los factores de caída de cada montaje.

Además, hemos visto que manteniendo constantes la masa y la cuerda (módulo de Young y sección de cuerda) en todas las caídas, el agente determinante para la fuerza de impacto es el factor de caída. Es decir, a medida que aumenta el factor de caída, la fuerza de impacto también lo hace. Esto lo vemos con las pendientes de las gráficas obtenidas; que tienen un valor de 2096, para los datos teóricos, y de 1584, para los reales.

Asimismo, aunque partimos de una función irracional, como nuestros rangos de datos son muy pequeños, hemos podido hacer una buena aproximación a una recta, ambas con coeficiente de correlación de 0,998. Estas ecuaciones cuantifican el aumento de la fuerza de impacto (teórica y real) con respecto al factor de caída. Pero, solo nos sirven para el rango de datos usados (no se pueden extrapolar) y para nuestras variables controladas.

Por otra parte, hemos observado que en los montajes en los que hay un rozamiento menor entre la cuerda y la roca o las cintas, la fuerza de impacto real se ve reducida. Esta reducción es bastante significativa, ya que en el caso en que las cintas están colocadas de forma óptima, la fuerza de impacto real se reduce hasta en un 20,38%. Esto se produce porque hay una cantidad menor de cuerda útil, dando lugar a factores de caída más elevados. Por tanto, podemos decir que la colocación de las cintas sí que influye en que una caída sea más peligrosa.

Aun así, el trabajo tiene algunas limitaciones, ya que en una caída de escalada intervienen muchos factores y no todos los hemos podido controlar:

Solo hemos podido estudiar caídas con una fuerza de impacto baja, para que no supongan un peligro para la integridad de la persona que realiza las pruebas o el asegurador. Asimismo, la altura inicial de caída no es exactamente la misma en todas las pruebas, pero sí similar.

Por otra parte, aunque contemplamos que sobre la cuerda útil no hay fricción, esto no es totalmente cierto, ya que siempre habrá un rozamiento mínimo, pero al ser muy bajo en comparación con el resto de la cuerda, lo negligimos. Además, no contamos con un método especialmente preciso para determinar en que parte de la vía la cuerda deja de ser útil, por lo que se trata de una aproximación.

Es por esto que podríamos ampliar el trabajo realizando pruebas con pesos muertos, para así poder asegurar que la altura inicial de todas las caídas es la misma y, también, para llevar a cabo pruebas con factores de caída más elevados y ver si, al ser más extremas, sigue habiendo un cambio evidente según la colocación de las cintas o no. También, podríamos realizar la misma parte práctica en otros tipos de roca y comparar su afectación con los datos recogidos en esta investigación.

Finalmente, es interesante remarcar que aunque tenemos algunas limitaciones, hemos podido cumplir nuestros objetivos. Además, hemos demostrado como una práctica que normalmente no se considera peligrosa entre algunos escaladores, tiene unas consecuencias reales. Colocar unas cintas demasiado cortas en una vía en concreto resulta en un aumento destacable de la fuerza de impacto y puede tener graves consecuencias para un escalador en una caída.

7. Webgrafía

1. Anclajes en vías de escalada. (2016). Recuperado 1 abril de 2022, de <https://escaladayferratas.com/material/equipacion-para-escalada/anclajes-de-escalada>
2. Barrabes. (s.f.). Cómo elegir tu cuerda de escalada. Recuperado 4 abril de 2022, de <https://www.barrabes.com/blog/consejos/2-10290/como-elegir-cuerda-escalad>
3. Carabiner. (2021). Recuperado 1 abril de 2022, de <https://en.wikipedia.org/wiki/Carabiner>
4. Del Campo, H. (s.f.). Factor de caída y fuerza de choque en trabajos en altura. Recuperado 24 mayo de 2022, de <http://www.granvertical.com/2015/08/24/factor-de-caida-y-fuerza-dechoque-en-trabajos-en-altura/#comments>
5. Desnivel. (2016). Arnesees de escalada: tipos, usos y consejos para acertar con la compra. Recuperado 4 abril de 2022, de <https://www.desnivel.com/material/material-noticias/arneses-tiposusos-y-consejos-para-acertar-con-la-compra/>
6. Desnivel. (2002). Seguridad en los mosquetones. Recuperado 9 abril de 2022, de <https://www.desnivel.com/escalada-roca/escalada-roca-material/seguridad-en-los-mosquetones/>
7. Destino climbing. (s.f.). Reuniones en Escalada Deportiva. Recuperado 4 abril de 2022, de <https://www.destinoclimbing.com/manual-de-escalada/reuniones-enescalada-deportiva/#Tipos de reunion en escalada deportiva>
8. Diego. (2013, febrero 20). Anclajes en escalada deportiva: Espits, Parabolts 34 Estudio de la fuerza de impacto en escalada deportiva y Químicos. [Entrada blog]. Recuperado 1 abril de 2022, de

- <https://escaladayferratas.com/material/equipacion-para-escalada/anclajes-de-escalada>
9. Equipovertical. (2011). El factor de caída. Recuperado 24 mayo de 2022, de https://www.equipovertical.com/WebRoot/StoreES3/Shops/eb7547/4D95/B027/3B65/2C58/2F37/D94C/9B20/C39B/El_factor_de_caida.pdf
 10. Escalada. (s.f.). Recuperado 20 marzo de 2022, de <https://es.wikipedia.org/wiki/Escalada>
 11. FEDME. (2022). Deportes: Modalidades de montaña. Recuperado 20 marzo de 2022, de <https://fedme.es/#1490369589829-289676ef-968>
 12. FEEC. (2020). Reglament de les competicions d'escalada esportiva. Recuperado 20 marzo de 2022, de <https://www.feec.cat/wp-content/uploads/2020/08/OK.-REG.-EscaladaEsportiva.pdf>
 13. Fernández, S. (2020). Tipos de zonas para escalar: Zonas y características. Recuperado 12 junio de 2022, de <https://deportesriesgo.com/tipos-deroca-para-escalar-zonas-y-caracteristicas/>
 14. Fixe. (s.f.). Anchors catalog. Recuperado 8 abril de 2022, de <https://fixeclimbing.com/public/ANCHORS.pdf>
 15. Fixe Climbing. (s.f.). Anclajes. Recuperado 9 abril de 2022, de <https://www.fixeclimbing.com/sport-climbing/anclajes/?pr=reunionrapel-plxanillaplaq-d10mm>
 16. Generación en Deporte. (s.f.). Cintas express. Recuperado 8 abril de 2022, de <https://www.generaciondeporte.es/cintas-express-para-escalada>
 17. Graterol, Mariluz. (2013). Rocas sedimentarias Arenitas. Arenisca. Recuperado 21 agosto de 2022, de <https://www.umadivulga.uma.es/banco-de-imagenes/rocas35sedimentaria-arenitas-arenisca/#~:text=La%20arenisca%20es%20una%20roca,Areniscas%20de%20grano%20Grueso%3A%202mm>

18. Luna, J. (2021). CALCULO DE LA FUERZA DE IMPACTO EN UNA CAÍDA LIBRE CON ARNÉS DE SEGURIDAD [Vídeo]. Recuperado 1 junio de 2022, de <https://www.youtube.com/watch?v=OXpRIU67zSs>
19. Madoz, I. (2016). Las reuniones de escalada en vías de varios largos y la resistencia de estas ante diferentes cargas y ángulos. (Trabajo de fin de grado). Universidad de Zaragoza, Aragón. Recuperado 8 abril de 2022.
20. Módulo de Young. (2021). Recuperado 13 mayo de 2022, de https://es.wikipedia.org/wiki/Módulo_de_Young
21. Parra, M. (2018). Rock Climbing in Czech Republic: What are the Best Spots?. Recuperado 10 septiembre de 2022, de <https://www.exploreshare.com/blog/rock-climbing-czech-republic-best-spots/>
22. Petzl. (2022). Belaying with the GRIGRI. Recuperado 4 abril de 2022, de <https://www.petzl.com/INT/en/Sport/Belay-Devices-And-Descenders/technical-content-product/GRIGRI>
23. Petzl. (2022). Instalar una reunión triangulada. Recuperado 8 abril de 2022, de <https://www.petzl.com/ES/es/Sport/Instalar-una-reuniontriangulada>
24. Petzl. (2022). Factor de caída y fuerza de choque - teoría. Recuperado 13 mayo de 2022, de <https://www.petzl.com/ES/es/Sport/Factor-de-caida-yfuerza-de-choque---teoria?ActivityName=Escalada>
25. PREMIER. (s.f.). Información sobre cuerdas. Recuperado 8 abril de 2022, de <https://www.cuerposdeintervencion.com/Web/MateriasComunes/RescateIntervencion/Cuerdas/Cuerdas/InfoCuerdas.htm>
26. Química.es. (2022). Pizarra (roca). Recuperado 21 agosto de 2022, de https://www.quimica.es/enciclopedia/Pizarra_%28roca%29.html
27. Redacción. (s. f.). Arenisca. Recuperado 21 agosto de 2022, de <https://www.rocasym minerales.net/arenisca/>

28. Reeves, M. (2011, mayo 30). Llanberis slate: The full tour. UKC. Recuperado 10 septiembre de 2022, de [https://www.ukclimbing.com/articles/destinations/llanberis_slate -
_the_full_tour-3682](https://www.ukclimbing.com/articles/destinations/llanberis_slate_-_the_full_tour-3682)
29. Reuniones y descuelgues ideales para vías de escalada Deportiva. (s.f.). Recuperado 4 abril de 2022, de [https://rocanbolt.com/index.php/2019/03/29/reuniones-y-
descuelguesideales-para-vias-de-escalada-deportiva/](https://rocanbolt.com/index.php/2019/03/29/reuniones-y-descuelguesideales-para-vias-de-escalada-deportiva/)
30. Rex. (2022). Climbing on Limestone: A complete guide. Recuperado 10 septiembre de 2022, de [https://rockclimbingguru.com/climbing-onlimestone-
a-complete-guide/](https://rockclimbingguru.com/climbing-onlimestone-a-complete-guide/)
31. Rex. (2022). Climbing on Sandstone: Everything you need to know. Recuperado 10 septiembre de 2022, de [https://rockclimbingguru.com/climbing-
onsandstone-everything-you-need-to-know/](https://rockclimbingguru.com/climbing-onsandstone-everything-you-need-to-know/)
32. Santes Piedra Natural. (s. f.). Conoce el granito y sus propiedades. Recuperado 21 agosto de 2022, de [https://santespiedranatural.com/conoce-granito-
propiedades/](https://santespiedranatural.com/conoce-granito-propiedades/)
33. Soriano J. C. (2015). Fuerza choque caída. Recuperado 17 mayo de 2022, de <https://www.slideshare.net/joaquincsoriano/fuerza-choque-caida-44109479>
34. Zúñiga, J. (s.f.). Cuadernos técnicos: N° 1. Cuerdas de seguridad. Recuperado 9 abril de 2022, de <http://www.olerdola.org/documentos/Cuerdas.pdf>

7.1. Figuras

- *Figura 1.* Cuerda Petzl Contact 9.8 mm. 70 metros. [Imagen]. (s.f.). Javi Sport. Recuperado 10 septiembre de 2022, de <https://www.javisport.com/dinamicas/400-cuerda-petzl-contact-98-mm-70metros.html>

- *Figura 2.* Altitude Arnés- Arnés De Alpinismo- Petzl. [Imagen]. (s.f.). Mercado libre. Recuperado 10 septiembre de 2022, de <https://listado.mercadolibre.com.mx/arnes-petzl>

- *Figura 3.* Petzl grigri. [Imagen]. (s.f.). Terradeporte. Recuperado 10 septiembre de 2022, de <https://terradeporte.es/producto/3957/>

- *Figura 4.* Black Diamond VaporLock Screwgate. [Imagen]. (s.f.). Tadoo. Recuperado 10 septiembre de 2022, de <https://tadoo.ws/cl/a/black-diamond-vaporlock-screwgate/2487>

- *Figura 5.* Multipack 5 Alpha Sport Set 12cm – DMM. [Imagen]. (s.f.). Blackisard. Recuperado 10 septiembre de 2022, de https://blackisard.com/escalada-en-roca/sets-express-escalada/packs-ahorro/1690-Multipack_5_Alpha_Sport_Set_12cm__DMM-5031290202091.html

- *Figura 6.* [Espit colocado en roca]. (s.f.). Escalada y ferratas. Recuperado 9 septiembre de 2022, de <https://escaladayferratas.com/material/equipacion-para-escalada/anclajes-de-escalada>

- *Figura 8.* [Químico colocado en roca]. (s.f.). Escalada y ferratas. Recuperado 9 septiembre de 2022, de <https://escaladayferratas.com/material/equipacion-para-escalada/anclajes-de-escalada>

- *Figura 9.* Típico descuelgue en una vía deportiva. [Imagen]. (s.f.). Maneras de escalar. Recuperado 9 septiembre de 2022, de <http://www.manerasdeescalar.com/2013/05/reuniones-en-escalada-deportiva-i.html>

- *Figura 10.* Reunión V doble argolla Fixe. [Imagen]. (s.f.). Escalada. Recuperado 9 septiembre de 2022, de <https://www.escalada.cl/product/reunion-v-doble-argolla-fixe/>

8. Anexos

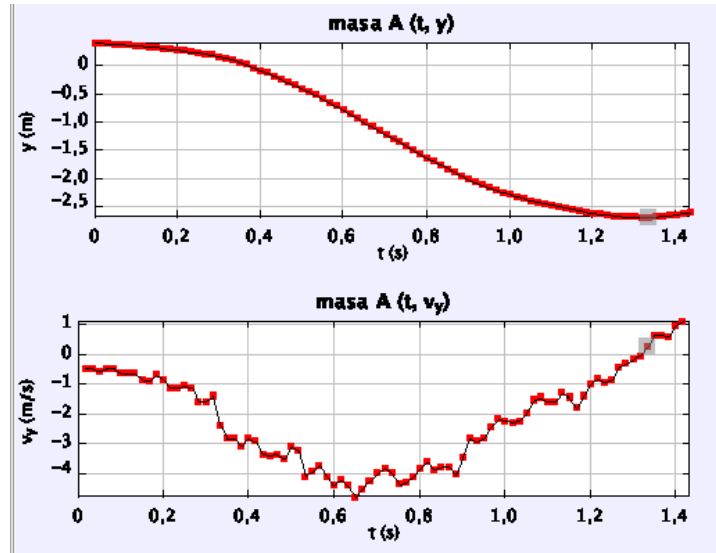
8.1. Datos montaje 1-a

A continuación encontramos la tabla de datos recogidos con el programa «Tracker» en el montaje 1-a del apartado 5. Donde y corresponde a la altura respecto a la cinta desde la que se cae (en metros) y t al tiempo (en segundos).

Cabe mencionar que para realizar los cálculos consideramos los datos desde el segundo 0,320s hasta el 1,150s.

Y ($\pm 0,01\text{m}$)	t ($\pm 0,001\text{s}$)		
		-0,71	0,580
0,39	0,030	-0,78	0,600
0,39	0,050	-0,86	0,620
0,38	0,070	-0,92	0,630
0,37	0,080	-1,00	0,650
0,36	0,100	-1,08	0,670
0,35	0,120	-1,16	0,680
0,34	0,130	-1,23	0,700
0,33	0,150	-1,29	0,720
0,31	0,170	-1,35	0,730
0,30	0,180	-1,42	0,750
0,29	0,200	-1,50	0,770
0,27	0,220	-1,56	0,780
0,25	0,230	-1,63	0,800
0,23	0,250	-1,69	0,820
0,21	0,270	-1,75	0,830
0,19	0,280	-1,82	0,850
0,16	0,300	-1,88	0,870
0,14	0,320	-1,95	0,880
0,11	0,330	-2,01	0,900
0,06	0,350	-2,06	0,920
0,02	0,370	-2,11	0,930
-0,03	0,380	-2,16	0,950
-0,08	0,400	-2,20	0,970
-0,13	0,420	-2,24	0,980
-0,18	0,430	-2,27	1,000
-0,24	0,450	-2,31	1,020
-0,29	0,470	-2,35	1,030
-0,35	0,480	-2,39	1,050
-0,41	0,500	-2,41	1,070
-0,45	0,520	-2,44	1,080
-0,52	0,530	-2,46	1,100
-0,59	0,550	-2,49	1,120
-0,65	0,570	-2,51	1,130
		-2,54	1,150

El programa «Tracker» también nos ha proporcionado las siguientes gráficas altura - tiempo y velocidad (en el eje y) - tiempo:



8.2. Datos montaje 1-b

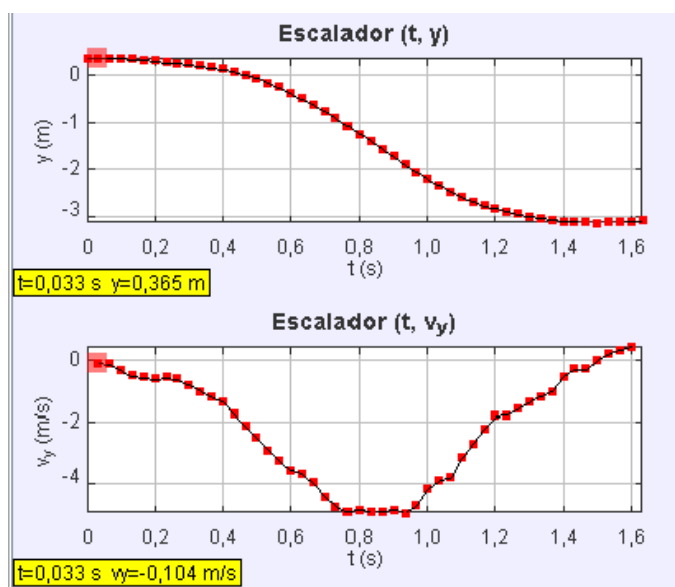
A continuación encontramos la tabla de datos recogidos con el programa «Tracker» en el montaje 1-b del apartado 5. Donde y corresponde a la altura respecto a la cinta desde la que se cae (en metros) y t al tiempo (en segundos).

Cabe mencionar que para realizar los cálculos consideramos los datos desde el segundo 0,200s hasta el 1,430s.

Y ($\pm 0,01\text{m}$)	t ($\pm 0,001\text{s}$)		
		-0,07	0,500
0,37	0,000	-0,16	0,530
0,37	0,030	-0,26	0,570
0,36	0,070	-0,38	0,600
0,36	0,100	-0,50	0,630
0,34	0,130	-0,62	0,670
0,32	0,170	-0,76	0,700
0,30	0,200	-0,92	0,730
0,28	0,230	-1,08	0,770
0,26	0,270	-1,25	0,800
0,24	0,300	-1,40	0,830
0,21	0,330	-1,57	0,870
0,17	0,370	-1,73	0,900
0,13	0,400	-1,90	0,930
0,08	0,430	-2,06	0,970
0,01	0,470	-2,21	1,000

-2,34	1,030	-2,95	1,270
-2,47	1,070	-3,00	1,300
-2,59	1,100	-3,04	1,330
-2,68	1,130	-3,11	1,370
-2,77	1,170	-3,14	1,400
-2,83	1,200	-3,19	1,430
-2,89	1,230		

El programa «Tracker» también nos ha proporcionado las siguientes gráficas altura - tiempo y velocidad (en el eje y) - tiempo:



8.3. Datos montaje 2-a

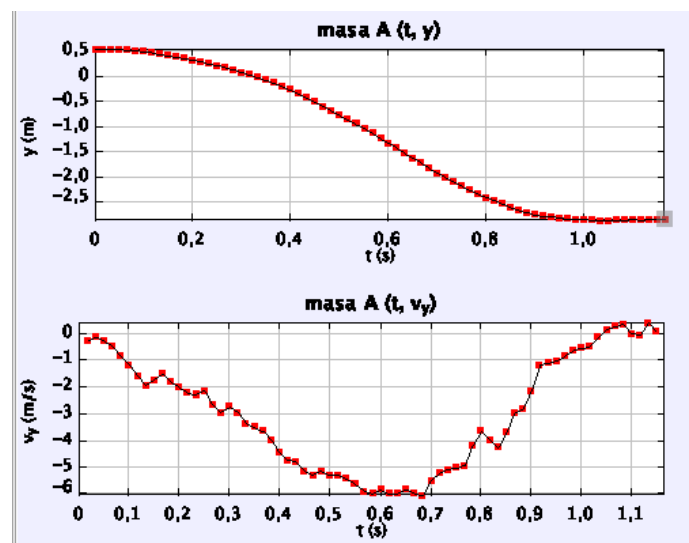
A continuación encontramos la tabla de datos recogidos con el programa «Tracker» en el montaje 2-a del apartado 5. Donde y corresponde a la altura respecto a la cinta desde la que se cae (en metros) y t al tiempo (en segundos).

Cabe mencionar que para realizar los cálculos consideramos los datos desde el segundo 0,100s hasta el 1,183s.

Y ($\pm 0,01\text{m}$)	t ($\pm 0,001\text{s}$)		
		0,45	0,133
0,55	0,000	0,42	0,150
0,54	0,017	0,39	0,167
0,54	0,033	0,37	0,183
0,54	0,050	0,33	0,200
0,53	0,067	0,30	0,217
0,52	0,083	0,26	0,233
0,50	0,100	0,22	0,250
0,48	0,117	0,19	0,267
		0,14	0,283

0,09	0,300	-2,26	0,767
0,05	0,317	-2,34	0,783
-0,01	0,333	-2,40	0,800
-0,07	0,350	-2,46	0,817
-0,12	0,367	-2,53	0,833
-0,19	0,383	-2,60	0,850
-0,26	0,400	-2,65	0,867
-0,34	0,417	-2,70	0,883
-0,41	0,433	-2,74	0,900
-0,50	0,450	-2,77	0,917
-0,59	0,467	-2,78	0,933
-0,67	0,483	-2,80	0,950
-0,76	0,500	-2,82	0,967
-0,85	0,517	-2,83	0,983
-0,93	0,533	-2,84	1,000
-1,03	0,550	-2,85	1,017
-1,12	0,567	-2,86	1,033
-1,23	0,583	-2,86	1,050
-1,32	0,600	-2,85	1,067
-1,42	0,617	-2,85	1,083
-1,52	0,633	-2,84	1,100
-1,62	0,650	-2,85	1,117
-1,71	0,667	-2,84	1,133
-1,82	0,683	-2,83	1,150
-1,92	0,700	-2,84	1,167
-2,00	0,717	-2,90	1,183
-2,09	0,733		
-2,17	0,750		

El programa «Tracker» también nos ha proporcionado las siguientes gráficas altura - tiempo y velocidad (en el eje y) - tiempo:



8.4. Datos montaje 2-b

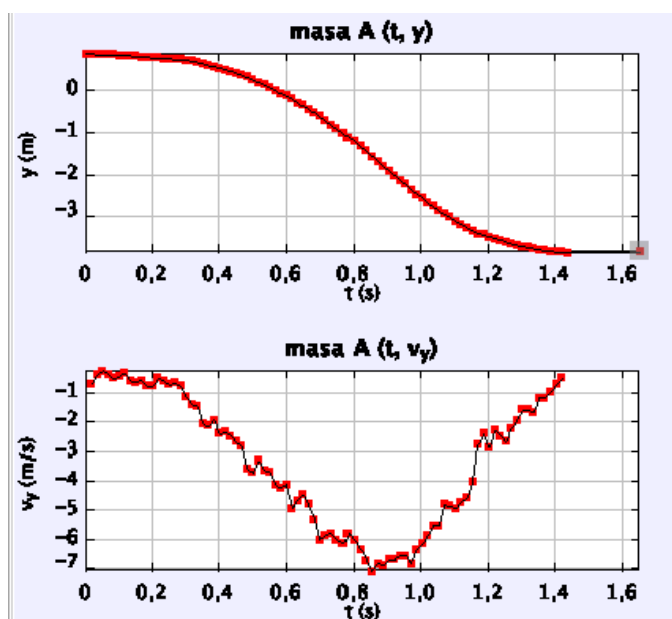
A continuación encontramos la tabla de datos recogidos con el programa «Tracker» en el montaje 2-b del apartado 5. Donde y corresponde a la altura respecto a la cinta desde la que se cae (en metros) y t al tiempo (en segundos).

Cabe mencionar que para realizar los cálculos consideramos los datos desde el segundo 0,150s hasta el 1,435s.

Y ($\pm 0,01\text{m}$)	t ($\pm 0,001\text{s}$)		
0,84	0,033	-0,29	0,633
0,84	0,050	-0,36	0,650
0,84	0,067	-0,44	0,667
0,83	0,083	-0,52	0,683
0,82	0,100	-0,62	0,700
0,82	0,117	-0,72	0,717
0,81	0,133	-0,81	0,733
0,80	0,150	-0,91	0,750
0,79	0,167	-1,01	0,767
0,78	0,183	-1,12	0,783
0,77	0,200	-1,22	0,802
0,76	0,217	-1,33	0,818
0,75	0,233	-1,43	0,835
0,74	0,250	-1,55	0,852
0,73	0,267	-1,66	0,868
0,72	0,283	-1,78	0,885
0,70	0,300	-1,89	0,902
0,68	0,317	-2,00	0,918
0,66	0,333	-2,12	0,935
0,64	0,350	-2,22	0,952
0,59	0,367	-2,33	0,968
0,56	0,383	-2,45	0,985
0,53	0,400	-2,55	1,002
0,49	0,417	-2,65	1,018
0,45	0,433	-2,74	1,035
0,40	0,450	-2,84	1,052
0,36	0,467	-2,93	1,068
0,31	0,483	-3,00	1,085
0,24	0,500	-3,09	1,102
0,19	0,517	-3,16	1,118
0,13	0,533	-3,24	1,135
0,07	0,550	-3,31	1,152
0,01	0,567	-3,38	1,168
-0,07	0,583	-3,40	1,185
-0,13	0,600	-3,46	1,202
-0,21	0,617	-3,50	1,218
		-3,53	1,235

-3,58	1,252	-3,77	1,368
-3,62	1,268	-3,80	1,385
-3,65	1,285	-3,83	1,402
-3,68	1,302	-3,85	1,418
-3,70	1,318	-3,89	1,435
-3,74	1,335		
-3,76	1,352		

El programa «Tracker» también nos ha proporcionado las siguientes gráficas altura - tiempo y velocidad (en el eje y) - tiempo:



8.5. Datos montaje 3-a

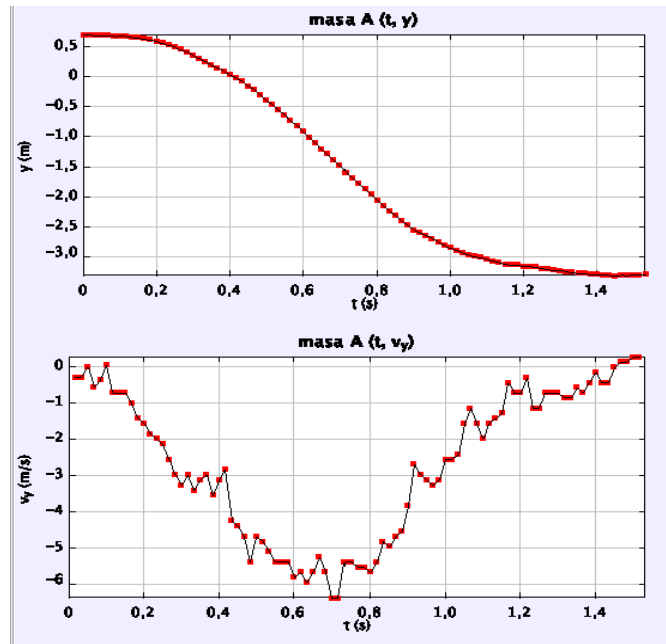
A continuación encontramos la tabla de datos recogidos con el programa «Tracker» en el montaje 3-a del apartado 5. Donde y corresponde a la altura respecto a la cinta desde la que se cae (en metros) y t al tiempo (en segundos).

Cabe mencionar que para realizar los cálculos consideramos los datos desde el segundo 0,200s hasta el 1,450s.

El programa «Tracker» también nos ha proporcionado las siguientes gráficas altura - tiempo y velocidad (en el eje y) - tiempo:

<u>Y ($\pm 0,01\text{m}$)</u>	<u>t ($\pm 0,001\text{s}$)</u>		
0,70	0,000	0,69	0,067
0,70	0,017	0,67	0,083
0,69	0,033	0,68	0,100
0,69	0,050	0,68	0,117
		0,66	0,133

0,65	0,150	-2,15	0,817
0,63	0,167	-2,23	0,833
0,62	0,183	-2,31	0,850
0,58	0,200	-2,40	0,867
0,57	0,217	-2,46	0,883
0,52	0,233	-2,55	0,900
0,50	0,250	-2,59	0,917
0,45	0,267	-2,64	0,933
0,42	0,283	-2,69	0,950
0,35	0,300	-2,74	0,967
0,31	0,317	-2,80	0,983
0,25	0,333	-2,84	1,000
0,19	0,350	-2,88	1,017
0,15	0,367	-2,93	1,033
0,09	0,383	-2,96	1,050
0,03	0,400	-2,98	1,067
-0,01	0,417	-3,00	1,083
-0,06	0,433	-3,03	1,100
-0,15	0,450	-3,07	1,117
-0,21	0,467	-3,09	1,133
-0,31	0,483	-3,11	1,150
-0,39	0,500	-3,13	1,167
-0,46	0,517	-3,13	1,183
-0,55	0,533	-3,15	1,200
-0,63	0,550	-3,15	1,217
-0,73	0,567	-3,16	1,233
-0,81	0,583	-3,19	1,250
-0,91	0,600	-3,20	1,267
-1,01	0,617	-3,21	1,283
-1,10	0,633	-3,22	1,300
-1,21	0,650	-3,24	1,317
-1,29	0,667	-3,25	1,333
-1,38	0,683	-3,27	1,350
-1,47	0,700	-3,27	1,367
-1,59	0,717	-3,29	1,383
-1,69	0,733	-3,28	1,400
-1,77	0,750	-3,29	1,417
-1,87	0,767	-3,30	1,433
-1,96	0,783	-3,31	1,450
-2,05	0,800		



8.6. Datos montaje 3-b

A continuación encontramos la tabla de datos recogidos con el programa «Tracker» en el montaje 3-b del apartado 5. Donde y corresponde a la altura respecto a la cinta desde la que se cae (en metros) y t al tiempo (en segundos).

Cabe mencionar que para realizar los cálculos consideramos los datos desde el segundo 0,183s hasta el 1,217s.

$Y (\pm 0,01m)$	$t (\pm 0,001s)$		
0,87	0,000	0,74	0,233
0,87	0,017	0,72	0,250
0,86	0,033	0,69	0,267
0,86	0,050	0,66	0,283
0,85	0,067	0,62	0,300
0,85	0,083	0,58	0,317
0,84	0,100	0,53	0,333
0,84	0,117	0,48	0,350
0,83	0,133	0,42	0,367
0,82	0,150	0,36	0,383
0,81	0,167	0,29	0,400
0,80	0,183	0,23	0,417
0,78	0,200	0,17	0,433
0,76	0,217	0,10	0,450
		0,03	0,467
		-0,05	0,483

-0,12	0,500	-2,52	0,883
-0,19	0,517	-2,62	0,900
-0,27	0,533	-2,73	0,917
-0,36	0,550	-2,83	0,933
-0,44	0,567	-2,93	0,950
-0,53	0,583	-3,02	0,967
-0,61	0,600	-3,10	0,983
-0,71	0,617	-3,19	1,000
-0,81	0,633	-3,30	1,017
-0,92	0,650	-3,39	1,033
-1,02	0,667	-3,47	1,050
-1,14	0,683	-3,55	1,067
-1,25	0,700	-3,62	1,083
-1,36	0,717	-3,70	1,100
-1,48	0,733	-3,79	1,117
-1,59	0,750	-3,84	1,133
-1,71	0,767	-3,91	1,150
-1,83	0,783	-3,99	1,167
-1,94	0,800	-4,06	1,183
-2,08	0,817	-4,14	1,200
-2,18	0,833	-4,21	1,217
-2,30	0,850		
-2,41	0,867		

El programa «Tracker» también nos ha proporcionado las siguientes gráficas altura - tiempo y velocidad (en el eje y) – tiempo:

