

Explorando la conexión entre la resolución de problemas y la comprensión de conceptos en física

Exploring the connection between problem solving and conceptual understanding in Physics

REVISTA
DE
ENSEÑANZA
DE LA
FÍSICA

Jason W. Morpew¹, José P. Mestre¹

¹University of Illinois at Urbana-Champaign.

E-mail: jmorphe2@illinois.edu

(Recibido el 5 de junio de 2018; aceptado el 15 de setiembre de 2018)

Resumen

Este estudio indaga si la habilidad de resolución de problemas es indicativa de la comprensión de los conceptos que subyacen a la solución del problema. Un grupo de estudiantes, de bajo desempeño académico, vieron una solución animada/narrada a un problema de dificultad considerable que trataba sobre dinámica angular. Esto ocurrió como parte de una preparación para un examen parcial en el contexto del curso de mecánica introductoria para científicos e ingenieros en el cual estaban inscriptos. Inmediatamente después de ver la solución narrada, los estudiantes intentaban resolver un problema que requería cálculos, pero isomorfo al del ejemplo. También respondían una pregunta conceptual que indagaba sobre cuánto habían entendido de los conceptos que subyacían a los cálculos. Se encontró que la habilidad para resolver el problema de cálculo no correlaciona con la comprensión conceptual. Esto sugiere que, el menos para estudiantes de bajo desempeño, la resolución de problemas y la comprensión conceptual en física constituyen distintos tipos de conocimiento que se desarrollan de manera independiente, y así, la instrucción debería enfocarse en el desarrollo de ambos tipos de conocimiento en lugar de dar por sentado que la habilidad para resolver problemas complicados es indicativa de la comprensión conceptual.

Palabras clave: Ejemplos resueltos; Resolución de problemas; Comprensión conceptual.

Abstract

This study probes whether problem solving ability is indicative of an understanding of the concepts underlying problem solutions. Low-performing students enrolled in an introductory mechanics course for scientists and engineers viewed an animated-narrated solution to a difficult problem in angular dynamics as preparation for an upcoming midterm exam. Immediately after viewing the solution, the students attempted to solve an isomorphic calculation-based problem and a conceptual question that probed whether students understood the concepts underlying the solution to the calculation-based problem. We found that ability to solve the calculation-based problem did not correlate with conceptual understanding. This suggests that, at least for low-performing students, problem solving and conceptual understanding in physics are different types of knowledge that develop independently, and as such, instruction should focus on the development of both types of knowledge rather than assuming that proficiency in solving complicated problems is indicative of conceptual understanding.

Keywords: Worked examples; Problem-solving; Conceptual understanding.

I. INTRODUCCIÓN

Ya sea de manera explícita o implícita, dos objetivos universalmente adoptados en cursos de Física introductoria para científicos o ingenieros son el de ayudar a los estudiantes a desarrollar habilidades de resolución de problemas y a promover la comprensión conceptual. En relación con el primero de estos objetivos, la estrategia típica consiste en asignar una considerable cantidad de problemas cuantitativos de tarea para que los estudiantes resuelvan. Para favorecer la comprensión conceptual de los estudiantes, se han hecho progresos considerables en los últimos 30 años mejorando la participación de los estudiantes en clase e indagando sobre su comprensión conceptual durante las mismas (Mazur, 1997), usando por lo general sistemas de respuesta-en-aula (*clickers*, en inglés). De esta manera, los docentes pueden abordar

comprensiones erróneas a nivel conceptual de manera in-situ durante las clases, asumiendo un papel de asesores del aprendizaje de los estudiantes, en contraposición con el de dispensadores de información, tan común en cursos en los cuales las clases son exclusivamente expositivas. Estos tipos de abordaje de aprendizaje activo son típicamente más efectivos para ayudar a los estudiantes a superar persistentes ideas previas en comparación con abordajes de clases magistrales (pasivas) (Freeman y otros, 2014; Hake, 1998).

En la sede de la Universidad de Illinois de Urbana-Champaign, usamos estrategias instruccionales basadas en investigación (Stelzer, Gladding, Mestre y Brookes, 2009; Stelzer, Brookes, Gladding y Mestre, 2010) para enseñar a miles de estudiantes cada año en grandes cursos introductorios. Utilizamos un abordaje “invertido”¹ que consiste en que los estudiantes, antes de venir a clases, vean unas “pre-clases” en formato de animación/narración (ver <https://per.physics.illinois.edu/resources/interactive-online-lectures/PHYS211/Player/>). En estas pre-clases se presentan los contenidos físicos básicos de modo que el tiempo de clase presencial se pueda dedicar a refinar la comprensión conceptual y a desarrollar habilidades de resolución de problemas. Además de incorporar aspectos de un abordaje “invertido”, el Departamento de Física también ha realizado una transición desde exámenes consistentes en el desarrollo de unos pocos problemas que requieren cálculos, y que eran luego corregidos a mano, hacia exámenes de opción múltiple que valoran tanto la resolución de problemas como la comprensión conceptual. Un análisis cuidadoso mostró que los exámenes de opción múltiple eran tan fiables y válidos como los problemas con cálculos (que luego se corregían a mano) para evaluar el desempeño estudiantil (Scott, Stelzer y Gladding, 2006).

El objetivo principal de este trabajo es mostrar que la gran mayoría de aquellos estudiantes que vieron el video-solución y que luego pudieron resolver el problema no muestran una comprensión conceptual profunda de su solución. En relación con ese objetivo primario, también mostraremos que contestar correctamente una pregunta conceptual de opción múltiple sobre la misma situación no indica necesariamente que haya una comprensión conceptual. Concluimos finalmente con un análisis más profundo sobre la lógica de las explicaciones conceptuales de los estudiantes.

Aunque usar ambos tipos de examen resulte igualmente “bueno”, en este trabajo sostenemos y de hecho demostramos, que valorar la comprensión conceptual continúa siendo esquivo. El presente trabajo tiene dos objetivos, uno primario y uno secundario. El secundario es explorar si estudiantes con bajo rendimiento, inscriptos en un curso introductorio de mecánica (con base en cálculo) pueden aprender a resolver un problema de mecánicas, con incidencia de cálculos, sobre mecánica rotacional, viendo un video/solución de un problema similar. El objetivo principal del artículo es mostrar que la gran mayoría de los estudiantes vieron ese video/solución y que posteriormente resuelven correctamente el problema, no muestran una comprensión conceptual que sostenga esa solución correcta. En relación a este objetivo principal, mostramos que responder correctamente una pregunta conceptual de opción múltiple relacionada con el mismo problematampoco es indicativo de haber alcanzado comprensión conceptual. Concluimos con una mirada más en profundidad a la lógica de los razonamientos que los estudiantes comparten al dar explicaciones sobre estas respuestas conceptuales.

II. EL CONTEXTO DE ESTUDIO

Los datos presentados aquí son una parte del un proyecto más amplio que apunta a ayudar a estudiantes con bajo desempeño, a mejorar su rendimiento en los exámenes del curso. Se trata de un curso de mecánica introductoria, para estudiantes de Ciencias e Ingeniería. Ese estudio se enfocó en los contenidos de un tercer examen parcial, que abarcaban cinemática y dinámica del movimiento angular, momento angular, momento de inercia, y equilibrio de cuerpos rígidos. Los estudiantes con notas en el tercio inferior en los dos primeros parciales recibieron un e-mail invitándolos a participar en un estudio diseñado con el fin de ayudarlos en la preparación del tercer parcial.

Sesenta y ocho estudiantes se ofrecieron voluntariamente a participar del estudio y fueron asignados aleatoriamente a una de dos condiciones de trabajo. Estas dos condiciones investigaban una pregunta de investigación que no se discutirá en el presente trabajo: si intentar la resolución del problema antes de la exposición al video/solución resultaba beneficioso para el aprendizaje en contraposición con ver el video sin intentar antes la solución. Los estudiantes en la primera condición (N = 30) intentaban resolver cinco problemas similares a aquellos que típicamente aparecen en el tercer parcial (nos referiremos a este como el “pre-test”). Después de intentar la resolución de estos cinco problemas, los estudiantes veían el video animado/narrado de la solución por parte de un experto de los cinco problemas que habían intentado resolver. Se comunicaba a los estudiantes que luego de ver el video, se les pediría resolver un post-test de

¹“flipped” en la versión original en inglés.

nueve problemas (cinco con cálculo y 4 conceptuales) que abarcaban los mismos contenidos que en el pre-test y la solución narrada. Los problemas de cálculo que resolvían en el post-test eran isomorfos a los problemas en los videos. Los problemas conceptuales estaban diseñados para valorar la comprensión de los conceptos que subyacían a los problemas numéricos. Las preguntas conceptuales eran de opción múltiple que pedían, además, una explicación para la opción elegida.

En la segunda condición, los estudiantes ($N = 38$) no abordaban los problemas del pre-test, sino que comenzaban por ver el video/solución de los cinco problemas del pre-test. Inmediatamente después de ver las soluciones, resolvían el mismo pos-test que el primer grupo. Así, al presentar los resultados en la sección siguiente, se encontrarán datos del pre-test de tan solo 30 estudiantes y datos del post-test del total de 68 estudiantes.

Restringiremos la discusión aquí a un problema del pre-test y a los dos problemas del post-test relacionados con éste, uno con cálculos y el otro conceptual. El problema del pre-test se muestra en la figura 1 (de aquí en más será nombrado como problema 1-1) Nótese que éste es un problema de dificultad considerable para estudiantes de un curso introductorio. Involucra la utilización de la Segunda Ley de Newton, en su formulación lineal (una ecuación que involucra dos tensiones que actúan sobre el disco y su aceleración lineal); también implica la utilización de la formulación rotacional de la Segunda Ley de Newton, $\tau = I\alpha$, alrededor del centro de masa del disco (resultando en una ecuación que vincula el momento de la tensión y la aceleración angular del disco sobre su centro de masa). Se requiere una tercera ecuación para encontrar el valor de las tres incógnitas (la tensión de la cuerda fijada a la pared, la aceleración y la aceleración angular) y ésta es la relación de vínculo entre la aceleración lineal y la aceleración angular ($R\alpha = a$).

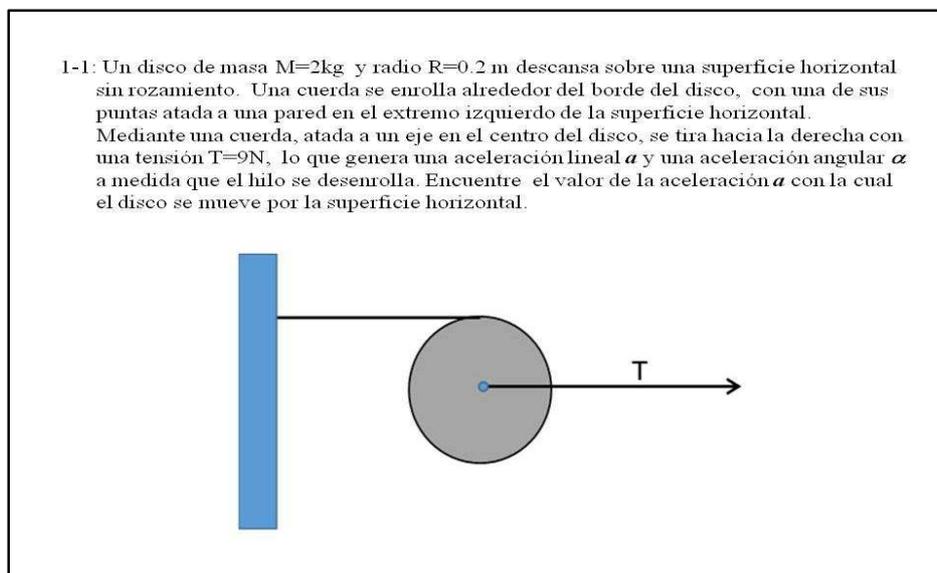


FIGURA 1. Problema del pre-test, con requerimiento de cálculos.

En la figura 2 puede verse la secuencia de la solución animada/narrada en el video para el problema 1-1. El abordaje es del tipo “solución a dos columnas”; en la columna izquierda se explicitan los conceptos utilizados y en la derecha se muestra cómo el concepto se expresa en forma de ecuaciones. Para los interesados en ver la narración/animación completa, la misma se encuentra en el siguiente URL: <https://youtu.be/V6YYWug3Lt8>. La solución siempre presentaba el concepto aplicado (columna izquierda) y después llevaba a cabo esa aplicación mostrando las ecuaciones resultantes en la columna derecha. Este abordaje tenía la intención de integrar conocimiento conceptual y procedimental con la implementación matemática.

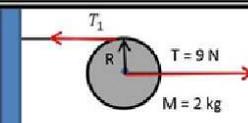
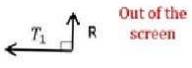
<p>Encontrar la aceleración, a, del disco mientras desliza por la superficie horizontal sin rozamiento</p> 	
Gran idea o procedimiento	Ecuaciones
Aplicar 2 ^{da} Ley de Newton al movimiento lineal del disco	$\vec{F}_{net} = M\vec{a}$ $T - T_1 = Ma \rightarrow 9N - T_1 = Ma \quad (1)$
Aplicar 2 ^{da} Ley de Newton al movimiento angular del disco	$\vec{\tau} = I\vec{\alpha}$ $\vec{R} \times \vec{T}_1 = I\vec{\alpha}$ 
Relacionar aceleración lineal y angular	$RT_1 \sin 90 = I\alpha \rightarrow RT_1 = I\alpha \quad (2)$ $R\alpha = a \rightarrow \alpha = \frac{a}{R}$
Momento de inercia de un disco es $\frac{1}{2}MR^2$	$RT_1 = I\alpha \rightarrow RT_1 = \frac{1}{2}MR^2 \frac{a}{R} \rightarrow T_1 = \frac{1}{2}Ma$ $9N - \frac{1}{2}Ma = Ma \rightarrow 9N = \frac{3}{2}Ma$
	$a = \frac{2}{3} \left(\frac{9N}{M} \right) = \frac{2}{3} \left(\frac{9N}{2kg} \right) = 3 \text{ m/s}^2$

FIGURA 2. Captura de pantalla del video con la solución animada/narrada experta del problema 1-1. La solución completa puede verse en <https://youtu.be/V6YYWug3Lt8>.

La solución animada/narrada estuvo diseñada en consonancia con los principios de aprendizaje multimedia (Mayer, 2011; Mayer y Moreno, 2003). Por ejemplo, se evitó leer texto presentado en la pantalla ya que esto causa interferencia entre los canales auditivos y visuales de las personas. Además, apuntamos a reducir la carga de memoria de los estudiantes animando los pasos algebraicos a medida que se describen las manipulaciones de las ecuaciones. La solución animada/narrada y los estudiantes tenían la posibilidad de detenerla en cualquier momento, comenzar de nuevo o reproducir cualquier segmento de la misma.

En la figura 3 se muestran los dos problemas del post-test relacionados con el problema 1-1. El problema 3-1, isomorfo al de la figura 1 (1-1), requiere de cálculos y la respuesta al mismo es -5.5 m/s^2 (ó 5.5 m/s^2 hacia abajo). El Problema 3-2 es conceptual y su respuesta es la opción “a”, dado que la tensión en la situación del diagrama de la figura 3 (Problema 3-1) es menor a la que correspondería a tirar de la cuerda con una fuerza mg . La explicación que se pide a los estudiantes en el problema 3-2 pretende corroborar si el estudiante eligió la respuesta correcta sin manejar adecuadamente los conceptos involucrados; o también detectar si algún estudiante marcó accidentalmente la opción incorrecta, pero da una explicación que muestra una adecuada comprensión conceptual.

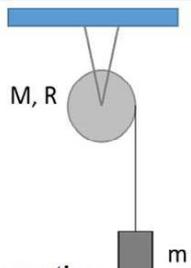
<p>3-1: Un disco rígido de masa $M=0.47 \text{ kg}$ y radio $R=30 \text{ cm}$ puede girar libremente sobre su eje, el cual se encuentra unido a un soporte que lo fija al techo. Un hilo se enrolla alrededor del borde del disco y una masa $m=0.3 \text{ kg}$ cuelga del extremo del mismo. ¿Cuál es la aceleración de la masa m?</p> <p>3-2: Suponga ahora que se quita la masa que cuelga (m) y que se tira del hilo hacia abajo con una tensión igual a mg. ¿Cómo es la aceleración angular comparada con la del problema anterior?</p> <p>a. La nueva aceleración angular es mayor que la del problema anterior</p> <p>b. La nueva aceleración angular es menor que la del problema anterior</p> <p>c. La nueva aceleración angular es igual a la del problema anterior</p> <p>Explique su razonamiento:</p>	
-----------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	---------------------------------------------------------------------------------------

FIGURA 3. Problemas del post-test. El problema 3-1, que requiere cálculos, es isomorfo al 1-1. El problema 3-2 es la pregunta conceptual.

Es importante discutir lo que queremos decir cuando decimos que los problemas 1-1 y 3-1 son isomorfos. En este trabajo, utilizamos el término isomorfo para describir problemas que se resuelven usando los mismos conceptos físicos. En este caso, tanto el problema 1-1 como el 3-1 se resuelven usando la Segunda Ley de Newton en su forma lineal ($F_{\text{net}} = ma$), la Segunda Ley de Newton en forma angular ($\tau = I\alpha$), y la relación entre las aceleraciones lineal y angular ($Ra = a$). Los trabajos referidos a la cognición se refieren a estas características con términos como la “estructura profunda” del problema (i.e., los conceptos más importantes que se utilizan para resolverlo). Está claramente establecido que los expertos se enfocan en la estructura profunda de un problema ya desde el comienzo de su solución (Chi, Feltovich y Glaser, 1981; Docktor y Mestre, 2014 y referencias en estos trabajos). Los novatos, por otro lado, se enfocan más en características superficiales de los problemas, como los objetos materiales que involucran. Debe notarse que, aunque los problemas 1-1 y 3-1 comparten la misma estructura profunda, (y por ello los llamamos isomorfos) las características superficiales presentan diferencias y la forma en la que los conceptos se aplican a los objetos en cada problema también. En el problema 1-1 hay un solo cuerpo (el disco) y dos hilos que proveen fuerzas; en el problema 3-1 hay dos cuerpos (el disco y la masa m que cuelga del hilo) y un hilo que permite transmitir una fuerza (los soportes que sujetan el disco/polea al techo son irrelevantes en este problema). Además, en el problema 1-1 la Segunda Ley de Newton se aplica al disco, tanto en su forma lineal como angular; en el problema 3-1, la Segunda Ley de Newton se aplica a la masa m en forma lineal y al disco en forma angular, y en un punto particular, que es su centro de masa (el torque que produce la tensión es igual al momento de inercia del disco alrededor de su centro de masa, multiplicado por la aceleración angular). Así, es probable que para un estudiante los dos problemas sean en alguna medida disímiles, ya que, al enfocarse en características superficiales, un estudiante podría ver al problema 1-1 como uno que involucra un disco y dos hilos y al problema 3-1 como uno que involucra un disco, una masa y una cuerda. La diferencia entre estructura profunda y superficial implica que los novatos deban poder ver la solución animada/narrada al problema 1-1 y “traducirla” para que pueda ser utilizada en una situación algo diferente como la del problema 3-1. Esto podría ser ciertamente difícil para estudiantes novatos.

III. PROCEDIMIENTO DE CLASIFICACIÓN

Las soluciones que los estudiantes llevaron a cabo, tanto de los problemas 1-1 como del 3-1, fueron corregidas a mano por cada uno de los autores, y clasificadas según una escala de 0 a 3. Las soluciones que mostraban muy poco desarrollo o avance, se clasificaron con 0; se asignó un 1 a los estudiantes que hacían progresos parciales (ej., sólo aplicar la Segunda Ley de Newton y generar una sola ecuación); se asignó 2 cuando se encontraban las tres ecuaciones necesarias para resolver el problema, pero había errores de manipulación matemática en la obtención del resultado numérico; el 3 correspondía a aquellas soluciones que tenían tanto el procedimiento como la respuesta correctos. Cada vez que los dos autores disintíamos en la clasificación de una prueba en particular, nos encontrábamos para alcanzar un consenso. Luego de la clasificación de las pruebas en la escala de 0 a 3, se combinaron las pruebas clasificadas con 0 y 1 en una única categoría que llamamos “incorrecta” y las pruebas clasificadas con 2 y 3 se combinaron en una única categoría llamada “correcta”. Para el problema 3-2, asignamos las soluciones a la categoría “correcta” la respuesta era “a” e “incorrecta” si era “b” o “c”. La explicación del problema 3-2 también se corrigió de manera independiente por ambos autores sobre la base del criterio correcto/incorrecto; si los autores discrepábamos en la asignación de la explicación a la categoría correcto/incorrecto, nos reuníamos para alcanzar un consenso. Todas las respuestas fueron clasificadas por ambos autores de manera independiente, con un acuerdo del 96% en la clasificación inicial y llegando al 100% al discutir los casos discordantes.

IV. RESULTADOS

En la Tabla I se muestran los resultados de los desempeños de los estudiantes en los problemas 1-1, 3-1, 3-2, y en la explicación del problema 3-2.

TABLA I. Porcentaje de estudiantes que resuelven correctamente los problemas de las figuras 1 y 3.

Problema 1-1	Problema 3-1	Problema 3-2	Problema 3-2 Explicación
Correcto/Total (%)	Correcto/Total (%)	Correcto/Total (%)	Correcto/Total (%)
4/30 (13.3%)	16/68 (23.5%)	10/68 (14.7%)	3/68 (4.4%)

Nota: Dado el diseño del estudio más amplio, sólo 30 estudiantes resuelven el problema 1-1.

Nótese las siguientes características de los datos presentados en la Tabla I:

- *El desempeño en el problema 1-1, del pre-test, se encontraba en un nivel basal.* Solo 4 de los 30 estudiantes (13.3%) que abordaron la solución del problema 1-1 lo resolvieron correctamente antes de ver el video con la narración/explicación. Este es un porcentaje muy bajo, pero no tan llamativo en virtud de las siguientes consideraciones: a) el problema era difícil, como se mencionó antes, b) los estudiantes que participaban del estudio habían sido invitados a participar del mismo porque estaban teniendo dificultades con los contenidos, y c) existen investigaciones previas que indican que los estudiantes hacen la mayor parte de su estudio para los exámenes a último momento, previo a los mismos (es decir, usan una estrategia de embotellamiento—ver Blasiman, Dunlosky, y Rawson, 2017; Hartwig y Dunlosky, 2012) y el estudio se llevó a cabo entre tres y cinco días antes del examen del curso. Dado que este desempeño mostraba que los estudiantes sabían muy poco sobre la solución de este problema, había un amplio margen para mejorar aprendiendo mediante la solución animada/narrada, y mostrar posteriormente ese aprendizaje en la resolución de los problemas 3-1 y 3-2 y en la explicación de 3-2.

- *Muy pocos estudiantes fueron capaces de generar una respuesta correcta en el problema 3-1 después de ver la solución animada/narrada.* Solo el 23.5% (16 de 68) de los estudiantes que vieron el video de la solución animada/narrada al problema 1-1 obtuvieron un puntaje de 2 o 3 al resolver la aceleración de la masa suspendida en el problema 3-1. Así, se infiere que hubo muy poco aprendizaje al ver la solución animada/narrada – los estudiantes no pudieron transferir la estructura profunda de la solución en un problema isomorfo (el 1-1) al nuevo contexto del problema 3-1, que presentaba diferentes características superficiales. Esto tal vez no sorprenda por varias razones: a) Los participantes de este estudio eran estudiantes que tenían dificultades a la hora de rendir parciales, b) Se conoce que la transferencia de aprendizajes es difícil de lograr (Mestre, 2005), y como se discutió antes, los dos problemas, (1-1 y 3-1) son isomorfos en su estructura profunda, pero no es sus características superficiales, c) los problemas 1-1 y 3-1 son difíciles para estudiantes de cursos introductorios ya que implican la aplicación de más de un único concepto físico, así como resolver un sistema de tres ecuaciones para la aceleración lineal, y d) el estudio se llevó a cabo entre tres y cinco días antes del parcial que evaluaba este material, y dada la estrategia de embotellamiento típicamente usada por los estudiantes, es probable que el único “tiempo de estudio” que hayan tenido los estudiantes hayan sido los aproximadamente 5 minutos y 18 segundos que les tomó ver/estudiar el video de la solución animada/narrada, que resulta claramente insuficiente para remediar los puntos débiles que pudieran tener. Decimo “aproximadamente” en la frase anterior dado que algunos estudiantes utilizaron algo más de tiempo, deteniendo y re-viendo la solución y algunos pasaron menos de los cinco minutos y 18 segundos; el tiempo promedio que pasaron los estudiantes viendo el video fue de cuatro minutos y 47 segundos (59% vieron la solución completa, 22% vieron menos de la mitad).

- *Solo tres estudiantes pudieron explicar correctamente por qué la aceleración angular en el problema 3-2 resulta mayor que en el problema 3-1.* Nótese que aún cuando 10 estudiantes contestaron correctamente la pregunta de opción múltiple del problema 3-2 (i.e., que la nueva aceleración angular, al tirar de la cuerda con una fuerza mg es mayor que en el problema 3-1), solo 3 de esos 10 dieron una explicación adecuada. De esta manera, en el conjunto global, solo 3 de 68 (4%) entienden que tirar de la cuerda con una fuerza de magnitud mg produce en el disco una aceleración angular mayor que colgar de la cuerda un cuerpo de peso mg . Uno de los tres estudiantes que dio una explicación correcta, también contestó correctamente el problema 3-1. Por lo tanto, mostrar la capacidad para resolver correctamente un problema de cálculo relativamente complejo (3-1) ¡no es un indicio confiable de haber entendido en términos conceptuales lo que ocurre en el problema que acaban de resolver!

- *La mayoría de los estudiantes no resolvieron correctamente el problema 3-1; aún así, hay evidencia de que los estudiantes sí hicieron intentos de aplicar conceptos del video.* Como se muestra en la figura 4, el 80% de los estudiantes obtuvo un puntaje de 0 en el problema 1-1, mientras que sólo el 50% obtuvo 0 para el problema 3-1. Por lo tanto, hubo un número de estudiantes que sí mejoraron su puntaje, indicando que hay un desarrollo de su comprensión sobre cómo abordar el problema 3-1, aún cuando no podían resolver de manera acabada este problema difícil con requerimiento de cálculo. Aún así, observamos evidencias de que los estudios transfieren características superficiales de los videos/solución que no se aplican al problema 3-1 (transferencia negativa). En la resolución del problema 3-1, 13 de 68 (19%) intentaron incorporar el valor de la tensión en las cuerdas que sostienen el centro del disco al techo.

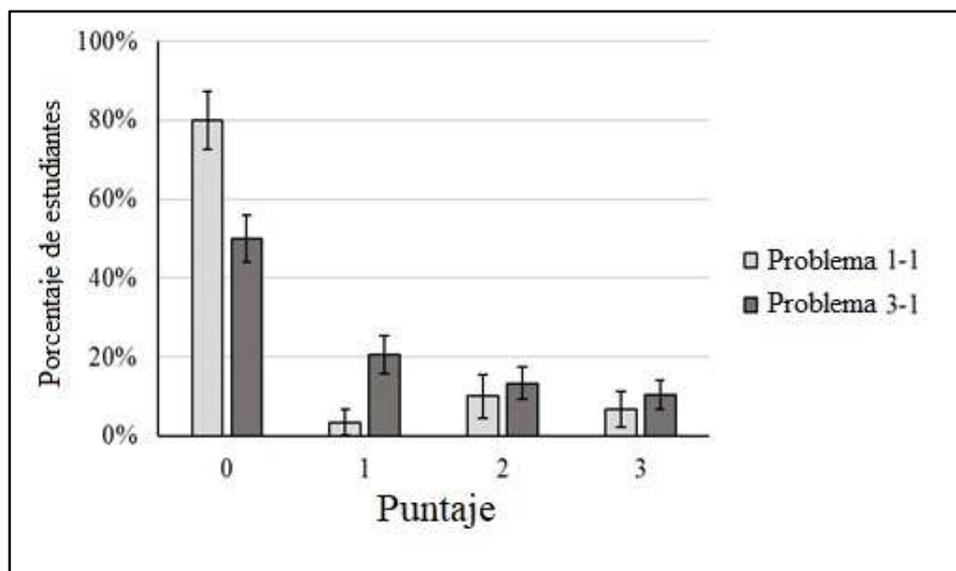


FIGURA 4. Puntaje de los estudiantes en los problemas 1-1 y 3-1.

En la Tabla II se muestra la distribución de las respuestas a la pregunta de opción múltiple del problema 3-2. Asimismo, en la Tabla III se describen las explicaciones que dan los estudiantes en respuesta al problema 3-2, y que corresponden a los casos en que previamente han contestado correctamente la pregunta de opción múltiple.

TABLA II: Respuestas al Problema 3-2

Respuesta elegida	Si 3-1 resultó correcta	Si 3-1 resultó incorrecta
	N (%)	N (%)
a) La aceleración angular aumenta	4 (25.0%)	6 (11.5%)
b) La aceleración angular disminuye	1 (6.2%)	2 (3.8%)
c) La aceleración angular permanece igual	11 (68.8%)	42 (80.8%)
Sin respuesta	0 (0.0%)	2 (3.8%)

Nota: Los porcentajes podrían no sumar 100% debido a redondeo.

TABLA III: Explicaciones al problema 3-2 cuando la opción múltiple es correcta

Categoría de explicación	N (%)	Ejemplos
Sin explicación	2 (20.0%)	
Misma fuerza/tensión	2 (20.0%)	<p>“Estás aplicando una fuerza igual a mg, así que son básicamente lo mismo”</p> <p>“La tensión que vos hacés y la de la masa que cuelga son ambas mg. Sin embargo, en el caso de hacer fuerza con la mano, no está el factor (-ma), así que Ia es mayor.”</p> <p>“Como ahora no hay masa colgando del hilo, el denominador es más chico, y el valor más grande.”</p>
Otra explicación	2 (20.0%)	<p>“La tensión hacia abajo ahora es más grande. Mg con $m=0.47$ es más grande que si $m=0.3$ kg. Esto hará que el disco gire más rápido, y así la aceleración será mayor. El τ es mayor.”</p> <p>“Como ahora no hay masa que actúe sobre el hilo, el denominador es más chico, y el valor es más grande”</p>
Fuerza extra en nuevo escenario	1 (10.0%)	“Una fuerza agregada hará que α sea más grande, ya que ahora el problema incluye la gravedad y una fuerza más.”
Se necesita fuerza mayor para que la tensión sea igual a mg (explicación correcta)	3 (30.0%)	<p>“La aceleración angular es $\alpha = \frac{\tau F}{I}$ y r permanecen iguales. Antes, teníamos que encontrar F que fuera $mg - T = ma$ entonces T es $mg - ma$. Aumentamos F tirando con una tensión hacia abajo de valor mg porque $T = mg$ y no $T = mg - ma$”</p> <p>“$F \times r = I\alpha$, $\alpha = \frac{F \times r}{I}$ [Mismo r e I]</p> <p>Depende de la tensión. $T = mg$. $T = x < mg$ para el otro problema”</p> <p>“$\tau = R \times F$ y $\alpha = \frac{\tau}{I}$, τ depende del radio y de la fuerza, I depende del Radio y la masa, a mayor F, mayor α”</p>

Nótese las siguientes características de los datos presentados en estas dos tablas:

- Responder correctamente la pregunta 3-1 no aumentó las chances de que un estudiante respondiera correctamente 3-2. La mayoría de los estudiantes indicó, incorrectamente, que tirar con una fuerza de módulo mg producía la misma aceleración que colgar un bloque de peso mg , y esto resultó independiente de si habían resuelto 3-1 de manera correcta. Solo 4 de los 16 estudiantes que contestaron correctamente 3-1 indicaron que la aceleración aumentaría. Un porcentaje similar de estudiantes, que respondieron incorrectamente el problema 3-1, indicaron que la aceleración sería mayor (6 de 52).

- De los estudiantes que eligieron “b” o “c” como respuesta en 3-2, el 93% explicó, incorrectamente, que tirar con una tensión de magnitud mg resultaba en una aceleración igual, o menor, en comparación con colgar un bloque de masa m , porque en ambos casos se aplicaba la misma tensión. De manera Alternativa, los estudiantes que elegían la opción “a” en el problema 3-2 presentaron una mayor diversidad de explicaciones. Un 30% de estos estudiantes correctamente explicaban que es necesario aplicar una fuerza mayor a la cuerda para tener una tensión igual a mg . Asimismo, la mitad de estos estudiantes o no fueron capaces de proveer una explicación o dieron una explicación que contradecía la opción elegida (por ejemplo, la misma fuerza o tensión en ambos casos). Los tres estudiantes restantes indicaron, incorrectamente, que en el problema 3-2 había una fuerza adicional o un cambio en la masa.

V. DISCUSIÓN

Como se señalara antes, evaluar la comprensión conceptual en cursos de física introductoria sigue siendo un objetivo difícil de alcanzar. Algunos docentes asumen que la habilidad para resolver problemas difíciles, que requieren cálculos, es indicativa de una comprensión conceptual subyacente. En este estudio, se pudo ver que no hubo diferencias de desempeño en el problema 3-2 (ni en la parte de opción múltiple ni en la explicación) entre quienes resolvieron correctamente el problema 3-1 y quienes no lo hicieron. Esto demuestra que la capacidad de resolver un problema de cálculo, con un grado considerable de dificultad, no implica la comprensión conceptual de la situación. Esta ausencia de correlación sugiere que, para estudiantes novatos, que luchan con sus exigencias académicas, la resolución de problemas basados en el

cálculo de cantidades específicas, y la comprensión conceptual, no están relacionadas. Puede ser que haya una mayor correlación entre resolución de problemas y comprensión conceptual para estudiantes novatos de mejor desempeño.

Otro tipo de preguntas que son utilizadas para valorar la comprensión conceptual de los estudiantes son las preguntas de opción múltiple, en las cuales se pide considerar el efecto de un cambio en un dado escenario. La suposición que subyace al hacer estas preguntas es que, si los estudiantes han desarrollado una adecuada comprensión conceptual, pueden seleccionar la opción correcta, que se corresponde con el efecto correcto. De manera similar, la capacidad para responder correctamente preguntas conceptuales de opción múltiple no es indicativa de una comprensión conceptual adecuada. Solo 3 de 10 individuos que respondieron correctamente a la pregunta de opción múltiple pudieron dar una explicación adecuada de su elección. Aún así, la respuesta de los estudiantes a la pregunta de opción múltiple, junto con la explicación provista, podría servir para identificar estudiantes que han alcanzado una comprensión conceptual incompleta. Aquellos estudiantes que en el problema 3-1 supusieron que la tensión en la cuerda atada a la masa suspendida era mg , también tendían a indicar, en el problema 3-2, que pensaban que tirar con una tensión de módulo mg no afectaría el valor de la aceleración angular del disco. Para estos estudiantes, la respuesta a la pregunta conceptual de opción múltiple era consistente con el error conceptual que cometen en el problema de cálculo.

Dada la dificultad de los problemas con cálculo de este estudio, es razonable mantener cierto escepticismo en relación al efecto sobre el aprendizaje que pudiera tener un único video de 5 minutos que apunta a resaltar los pasos de solución necesarios para resolver el problema 1-1. De hecho, en este estudio observamos que la cantidad de estudiantes que vieron el video/solución del problema 1-1 y luego resolvieron de manera correcta (o con errores menores) el problema 3-1 aumentó en apenas 10 puntos porcentuales. Aún cuando no encontramos un aumento considerable en el porcentaje de soluciones correctas, sí observamos un corrimiento en los razonamientos de los estudiantes. Después de ver el video/solución de 5 minutos, se observó un decrecimiento de 30 puntos porcentuales en el número de soluciones con puntaje cero. Este decrecimiento se debe a la disminución del número de estudiantes que hacen poco o ningún progreso. Después de ver el video, más estudiantes escribieron ambas formas de la Segunda Ley de Newton, aún cuando frecuentemente tenían dificultades para aplicarlas correctamente o combinarlas de manera adecuada para resolver el problema. Además, encontramos evidencia de transferencia negativa de características superficiales del video/solución a la solución del problema 3-1. En el problema 1-1, la tensión en la cuerda conectada a la pared es importante, mientras que en el 3-1, la tensión en las cuerdas que sostienen al disco del techo no tienen efecto alguno sobre la aceleración de la masa. Esta transferencia negativa observada es consistente con investigaciones previas que encontraron que los novatos tienden a prestar atención a características superficiales de los problemas más que a la estructura profunda. (Chi, y otros, 1981; Docktor y Mestre, 2014). Esto sugiere que la instrucción que señala la relevancia de ciertas características, así como la irrelevancia de otras, podría ser beneficiosa, en particular para estudiantes con bajo desempeño.

Lo esquivo de la comprensión conceptual en física, y su consecuente dificultad de valoración en novatos, ha sido observado también en otros contextos. Por ejemplo, Kryjevskaja, Stetzer y Le (2014) les plantearon a estudiantes principiantes, en un examen parcial, una situación en la cual un bloque de 10kg en una superficie horizontal con coeficiente de rozamiento estático $\mu_e=0,4$, era empujado con una fuerza horizontal de 30N, y aún así permanecía en reposo. Los estudiantes debían comparar las magnitudes de las fuerzas de fricción. Más del 80% de los estudiantes pudieron responder, correctamente, que la magnitud de ambas fuerzas era la misma. Lo llamativo es que, en una pregunta de seguimiento, se planteaba la misma situación, pero ahora $\mu_e=0,6$ y en este caso el desempeño caía un 20%, y quienes respondían incorrectamente afirmaban que la fuerza de fricción era mayor que antes. Cabe notar que en este ejemplo ambos problemas son conceptuales, pero en el problema de seguimiento, un 20% de los estudiantes abandonaron el análisis correcto (aplicar la Segunda Ley de Newton) como habían hecho en el problema original, y optaron por un abordaje alternativo, erróneo, (como, por ejemplo, utilizar la ecuación para el valor máximo de la fuerza de roce $F_c=\mu_e N=\mu_e mg$, que no se aplica en este caso)

¿Cuáles son algunas implicaciones de este estudio para la instrucción? En los cursos de física introductoria, tendemos a enfocar la enseñanza en el desarrollo de habilidades de resolución de problemas. Aún cuando los docentes sí discuten conceptos físicos durante la instrucción, las tareas, los problemas en los prácticos y en los exámenes se enfocan típicamente en resolver problemas numéricos. Este foco muy probablemente esté mandando a los estudiantes el mensaje de que la destreza en el cálculo es en sí mismo el objetivo de aprendizaje. Si bien acordamos en que la resolución de problemas, así como la destreza en el cálculo son habilidades importantes a enseñar a los estudiantes, creemos que discutir cómo los distintos conceptos se articulan en cada situación física es igualmente importante, y creeríamos que esta importante habilidad no se enseña ni evalúa explícitamente en la mayoría de los cursos de física. La creencia, equivocada, de que la tensión en una cuerda de la que cuelga un cuerpo de masa m es mg , qué solo es correcto

cuando el cuerpo no está acelerado, se ha observado en estudios previos (Mestre, 2002; Feil y Mestre, 2010). Así, el escenario del problema 3-1 se constituye en una posibilidad para ayudar a los estudiantes a entender que esa suposición lleva a una gran contradicción: si la tensión es mg , esta se equilibra con la fuerza gravitacional mg , y por lo tanto la fuerza neta es cero y el bloque estaría sometido a una aceleración nula, resultado claramente alejado de la intuición física. Un abordaje similar podría hacerse en el ejemplo de Kryjevskaja y otros discutido en el párrafo anterior. Desafiar a los estudiantes con este tipo de preguntas conceptuales que no requieren cálculos durante el curso de la instrucción ayudaría a desarrollar una comprensión conceptual que acompañe al desarrollo de las habilidades de resolución de problemas.

REFERENCIAS

- Blasiman, R. N., Dunlosky, J., y Rawson, K. A. (2017). The what, how much, and when of study strategies: Comparing intended versus actual study behavior. *Memory*, 25, 781-792. DOI: 10.1080/09658211.2016.1221974
- Chi, M.T.H., Feltovich, P.J. y Glaser, R. (1981). Categorization and representation of physics problems by experts and novices. *Cognitive Science*, 5, 121-152.
- Docktor, J.L. y Mestre, J.P. (2014). Synthesis of discipline-based education research in physics. *Physical Review Special Topics: Physics Education Research*, 10, (58pp). DOI: 10.1103/PhysRevSTPER.10.020119
- Feil, A. y Mestre, J.P. (2010). Change Blindness as a Means of Studying Expertise in Physics. *Journal of the Learning Sciences*, 19(4), 480-505.
- Freeman, S., Eddy, S.L., McDonough, M., Smith, M.K., Okoroafor, N., Jordt, H., Wenderoth, M.P. (2014). Active learning increases student performance in science, engineering, and mathematics. *Proceedings of the National Academy of Sciences*, 111(23), 8410-8415. doi: 10.1073/pnas.1319030111.
- Hake, R. (1998). Interactive-engagement vs traditional methods: A six-thousand-student survey of mechanics' test data for introductory physics courses. *American Journal of Physics*, 66, 64-74.
- Hartwig, M. K., y Dunlosky, J. (2012). Study strategies of college students: Are self-testing and scheduling related to achievement? *Psychonomic Bulletin and Review*, 19, 126-134. DOI: 10.3758/s13423-011-0181
- Kryjevskaja, M., Stetzer, M.R., y Le, T.K. (2014). Failure to engage: Examining the impact of metacognitive interventions on persistent intuitive reasoning approaches. In P. V. Engelhardt, A. D. Churukian, and D. L. Jones (Eds.), 2014 *PERC Proceedings* (pp. 143-146). Minneapolis, MN, July 30-31. doi:10.1119/perc.2014.pr.032
- Mayer, R.E. y Moreno, R. (2003). Nine ways to reduce cognitive load in multimedia learning. *Educational Psychologist*, 38, 43-52.
- Mayer, R.E. (2011). Applying the science of learning to multimedia instruction. In J.P. Mestre y B.H. Ross (Eds.), *The Psychology of learning and motivation: Cognition in education*, Vol. 55 (pp. 78-108). San Diego, CA: Academic Press.
- Mazur, E. (1997). *Peer Instruction: A User's Manual*. Upper Saddle River, NJ: Prentice Hall.
- Mestre, J.P. (2002). Probing adults' conceptual understanding and transfer of learning via problem posing. *Journal of Applied Developmental Psychology*, 23, 9-50.
- Mestre, J.P. (Ed.) (2005). *Transfer of Learning from a Modern Multidisciplinary Perspective* (393 págs.). Greenwich, CT: Information Age Publishing.
- Scott, M., Stelzer, T. y Gladding, G. (2006). Evaluating multiple-choice exams in large introductory physics courses. *Physical Review Special Topics: Physics Education Research*, 2, (14 pp). DOI: 10.1103/PhysRevSTPER.2.020102

Stelzer, T., Brookes, D., Gladding, G., y Mestre, J. (2010). Impact of multimedia learning module on an introductory course on electricity and magnetism. *American Journal of Physics*, 78(7), 755-759. <https://doi.org/10.1119/1.3369920>

Stelzer, T., Gladding, G., Mestre, J. y Brookes, D.T. (2009). Comparing the efficacy of multimedia modules with traditional textbooks for learning introductory physics content. *American Journal of Physics*, 77(2), 184-190. <https://doi.org/10.1119/1.3028204>