

## **Tensiones residuales: una propuesta metodológica para alumnos de ingeniería industrial**

## **Tensões residuais: uma proposta metodológica para estudantes de engenharia industrial**

DOI:10.34117/bjdv10n1-047

Recebimento dos originais: 04/12/2023

Aceitação para publicação: 08/01/2024

**Juan Andrés Brekes Gregoris**

Ingeniero industrial

Institución: Departamento de Ingeniería Industrial, Universidad Tecnológica Nacional

Dirección: Acuña 49, Rafaela, Argentina

Correo electrónico: jbrekesgregoris@gmail.com

**Felipe Víctor Díaz**

Doctor en Ingeniería

Institución: Departamento de Ingeniería Electromecánica, Universidad Tecnológica Nacional (CONICET)

Dirección: Acuña 49, Rafaela, Argentina

Correo electrónico: felipe.diaz@frra.utn.edu.ar

### **RESUMEN**

El presente trabajo propone una metodología para la enseñanza del tema Tensiones Residuales, la cual está adaptada a los estilos de aprendizaje inherentes a alumnos de Ingeniería, a fin de mejorar la aproximación de los mismos al contexto laboral en el que se desempeñarán. Los resultados revelan que el 90% de los alumnos consultados consideró como satisfactorio el acceso a los nuevos contenidos. Por otra parte, se observaron niveles aceptables de interrelación de los temas transmitidos con contenidos previos, adquiridos por los alumnos tanto dentro como fuera del ámbito académico. Los resultados obtenidos en este trabajo alientan la utilización de esta metodología para la enseñanza de temas afines.

**Palabras clave:** tensiones residuales, metodología de enseñanza activa, estilos de aprendizaje, alumnos de ingeniería industrial.

### **RESUMO**

Este documento propõe uma metodologia para o ensino da questão das Tensões Residuais, que é adaptada aos estilos de aprendizagem inerentes aos estudantes de engenharia, a fim de melhorar a sua aproximação ao contexto de trabalho em que serão realizados. Os resultados mostram que 90% dos alunos consultados consideraram satisfatório o acesso ao novo conteúdo. Por outro lado, observaram-se níveis aceitáveis de inter-relação entre tópicos transmitidos com conteúdos anteriores, adquiridos por estudantes dentro e fora da área acadêmica. Os resultados obtidos nesse trabalho incentivam o uso dessa metodologia para ensinar disciplinas relacionadas.

**Palavras-chave:** tensões residuais, metodologia ativa de ensino, estilos de aprendizagem, estudantes de engenharia industrial.

## 1 INTRODUCCIÓN

En la actualidad, los ingenieros recién graduados que ingresan al mercado laboral sufren serios problemas en cuanto a los requisitos que el mismo exige debido a que, además de habilidades técnicas, dicho mercado exige otros aspectos considerados “blandos”, los cuales no son tomados en cuenta en el modelo curricular tradicional. En cuanto al futuro laboral, se considera que se dependerá bastante más de capacidades para el liderazgo y trabajo en equipo que de capacidades técnicas [1]. Tanto la evolución en los requerimientos y destrezas exigidas, como el continuo y acelerado cambio tecnológico e industrial, hacen necesario replantear el modelo de educación vigente en ingeniería [2], el cual, en líneas generales, muestra pocos cambios desde hace varias décadas.

No obstante esto, un número creciente de docentes, en distintas facultades de Ingeniería, están abandonando el formato de clase tradicional, en el cual los alumnos son meros receptores de información y conceptos, a fin de abordar el proceso de enseñanza desde una perspectiva más activa, en la cual se estimula a los mismos a construir conocimiento [3]. Esta orientación, basada en la enseñanza de competencias, se expresa actualmente a partir del desarrollo de nuevos profesionales en todas las ramas de la ingeniería [4]. Cabe destacar que el término competencia alude a una combinación de aspectos personales subyacentes, como son la comunicación, el auto desarrollo, la creatividad y la capacidad de reflexión y análisis. Con esta orientación se busca disminuir las enormes dificultades, presentes en diferentes países, en cuanto a las denominadas carreras STEM (por “science, technology, engineering and mathematics”), las cuales resultan indispensables para el desarrollo económico y social de cualquier nación [5].

El propósito de este trabajo consistió en implementar y evaluar la eficacia de una metodología de enseñanza activa, la cual fue empleada a fin de desarrollar el tema Tensiones Residuales, en la cátedra Estática y Resistencia de Materiales de la carrera Ingeniería Industrial (Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Rafaela), con alumnos de tercer y cuarto año de la misma. Es importante destacar que el estudio de este tipo de tensiones, inducidas comúnmente en el procesamiento de aceros y otras aleaciones, es de gran relevancia debido a que las mismas han generado y siguen generando fallas catastróficas [6]. Se destaca, también, que los docentes de dicha cátedra investigan, en el área de las Tensiones Residuales, desde hace más de doce años. La presente metodología propone diferentes fases, una de las cuales, de trabajo grupal, simula una reunión propia de la vida profesional a la vez que estimula a los alumnos a generar conocimiento. Los resultados obtenidos en este trabajo revelan que la totalidad

de los alumnos consultados ha coincidido en que el tema desarrollado reviste una importancia media/alta en su capacitación como futuros ingenieros. Además, el 90% de los mismos ha considerado como muy satisfactoria la incorporación de diferentes contenidos. Cabe destacar que se observaron niveles aceptables de interrelación de los temas transmitidos con otros contenidos previos, tanto de la propia asignatura como de otras afines. A su vez, los alumnos han sido capaces de generar relaciones con otras áreas, fuera del ámbito académico, lo cual ha contribuido a una mejor incorporación de los nuevos contenidos. Finalmente, los resultados obtenidos en este trabajo alientan la utilización de la presente metodología en otras áreas de la mencionada asignatura.

## 2 METODOLOGÍA

Los detalles inherentes a la elección del modelo de enseñanza, así como la justificación teórica de la metodología empleada, pueden consultarse en un trabajo previo [7]. Como se menciona más arriba, dicha metodología posibilitó desarrollar el tema Tensiones Residuales, el cual pertenece a la unidad: “Elementos de la Teoría de Tensiones y Deformaciones” de la presente asignatura, con el objetivo de facilitar la comprensión del marco conceptual de dichas tensiones, su génesis, su clasificación, la importancia de su determinación en aplicaciones prácticas y su peligrosidad.

Es importante destacar que el desarrollo del presente tema se dividió en etapas o fases, cada una de las cuales, con objetivos específicos, estuvo orientada a mejorar la eficacia en cuanto al acceso a contenidos nuevos.

### 2.1 FASE INTRODUCTORIA A PARTIR DE ANALOGÍAS

En esta fase inicial se buscó orientar el pensamiento hacia la generación de modelos vinculados con la introducción de Tensiones Residuales, la cual puede responder a efectos térmicos y/o mecánicos. Para este fin se llevaron a cabo dos planteos de situaciones técnicas, involucrando fenómenos térmicos y mecánicos, a partir de analogías construidas con elementos y situaciones cotidianas. Dichos planteos fueron:

- Cocción de un trozo de carne congelada, haciendo especial hincapié en que las diferentes capas de dicho trozo, desde la superficie al interior, poseen diferentes temperaturas y niveles de cocción para cada tiempo evaluado. Esta analogía sirvió para iniciar el proceso mental que concluye con la comprensión del modelo utilizado para explicar cómo se generan las Tensiones Residuales cuyo origen es térmico.

- Corte de trozos finos de manteca con un cuchillo, observando especialmente que las capas que han estado en contacto con el elemento cortante sufren un desplazamiento desde su posición original, deformando plásticamente a las capas adyacentes. Esta segunda analogía inició el camino en cuanto a la comprensión del modelo que explica la generación de tensiones residuales de origen mecánico. espacio

Al finalizar esta fase de analogías, la cual se llevó a cabo con la asistencia de diapositivas, se pidió a los alumnos que intenten extrapolar estos comportamientos a los tratamientos térmicos y procesos mecánicos a los cuales son sometidos comúnmente las aleaciones metálicas, a fin de aproximar su comportamiento. Se procuró, además, inducir la búsqueda mental de relaciones de los comportamientos planteados con otros que pudieran hallarse en diferentes contenidos, tanto de la propia asignatura como de otras afines.

## 2.2 TRABAJO GRUPAL

Esta segunda fase se inició con la formación de grupos de 4 alumnos a partir de un muestreo aleatorio (elección al azar mediante números) [8]. Luego, cada grupo dispuso de una hoja con una situación técnica junto a una guía de preguntas orientativas. Según pudo constatarse luego, los grupos resultaron ser uniformes en cuanto a las diversas capacidades de los integrantes, lo que permitió, en cada grupo, que estudiantes con mayor facilidad para la comprensión de conceptos abstractos trabajen en conjunto con alumnos que evidencian mayores dificultades para dicha comprensión, lo cual generó un clima de aprendizaje y discusión entre los mismos.

Las mencionadas situaciones técnicas fueron dos; a cada grupo le correspondió solo una de las mismas. Las guías de preguntas orientativas fueron cuidadosamente formuladas a fin de que los diferentes grupos puedan elaborar una explicación del fenómeno físico subyacente, apoyados tanto en conocimientos como en experiencias previas (dentro y/o fuera del ámbito académico). Las situaciones técnicas y las preguntas orientativas fueron las siguientes:

- Tensiones residuales de origen térmico a partir del análisis de una componente mecánica sometida a un proceso de temple [9,10]:
  - El enfriamiento en el proceso de temple: ¿ocurre en el volumen de toda la componente al mismo tiempo?

- ¿Cómo es el comportamiento de los metales cuando son calentados y cuando son enfriados?
- Si una capa de la componente busca contraerse mientras que la inmediatamente próxima se resiste: ¿qué puede generarse?
- En la interacción entre dos capas adyacentes: ¿puede influir la velocidad de calentamiento, la velocidad de enfriamiento y/o el medio usado para enfriar?
- Intente desarrollar una definición de “Tensiones residuales de origen térmico”.  
espacio
- Tensiones residuales de origen mecánico analizando una componente sometida a un proceso de fresado [11-13]:
  - ¿Se producirá fricción entre la pieza y la fresa? ¿Qué puede generar esta fricción?
  - ¿Cómo es la microestructura de los metales? ¿Cómo se imaginan que quedará la microestructura de la capa superficial luego del fresado?
  - Si la fresa se mueve de forma circular para generar la remoción de material: ¿las tensiones introducidas serán uniformes?
  - ¿Podría afectar, en algún aspecto, la velocidad de corte, la profundidad de pasada y/o la dirección en que se realice dicho fresado?
  - Intente desarrollar una definición de “Tensiones residuales de origen mecánico”.

Las preguntas orientativas fueron acompañadas por las Figuras 1 y 2, las cuales constituyen representaciones gráficas de los procesos analizados. La Figura 1 representa el comportamiento de capas de iones metálicos al ser sometidos a una fuente externa de calor, mientras que la Figura 2 muestra la superficie generada en una placa de aleación de aluminio luego de un proceso de fresado frontal (los puntos A, B y C corresponden a puntos de evaluación).

Al finalizar el análisis y la discusión en cada grupo, cada uno de los mismos expuso sus conclusiones. Para este fin se eligió un alumno al azar, como representante de cada grupo, para exponer al resto de la clase. Al finalizar estas exposiciones, se propuso el debate y discusión de ideas entre todos los alumnos, a fin de mejorar las definiciones y razonamientos alcanzados. Pudo observarse, al final de esta fase, que dichas definiciones y razonamientos fueron altamente satisfactorios. Es posible afirmar, entonces, que el camino propuesto (trabajo grupal a partir de preguntas orientativas, exposición y discusión) fue de utilidad para el propósito prefijado.

Figura 1. Modelo de iones en un sólido sometido a un flujo de calor.

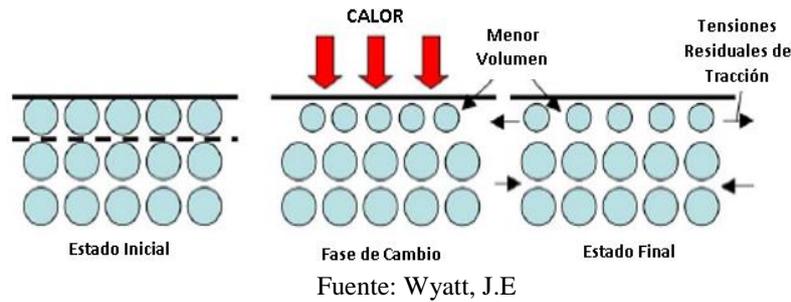
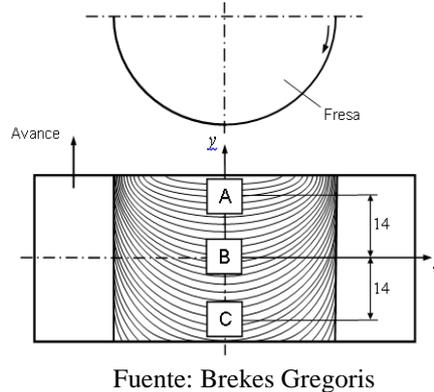


Figura 2. Superficie generada mediante fresado frontal. Las medidas son en milímetros.



### 2.3 EXPOSICIÓN A CARGO DEL PROFESOR

Esta tercera fase puede ser considerada como el último tramo de un camino ascendente en cuanto al grado de dificultad inherente al presente aprendizaje. Es importante destacar que los alumnos abordaron esta última fase con la preparación mental y emocional adecuada para la comprensión de los fenómenos y modelos a transmitir. En esta fase, el profesor a cargo de la cátedra, a partir de una búsqueda de síntesis, procedió a exponer los contenidos técnicos específicos correspondientes al tema desarrollado asistido por diapositivas y videos. La finalidad de esta etapa fue brindar la explicación de aquellos fenómenos y modelos que hubiesen resultado de muy difícil acceso para todos los alumnos en la fase grupal previa. Cabe destacar que, debido a esta fase previa de aprendizaje activo, la cual elevó los niveles de atención de los alumnos, dichos fenómenos y modelos, algunos de elevado nivel de abstracción, resultaron aceptablemente comprendidos, como se muestra en la próxima sección.

Dicha exposición a cargo del profesor tuvo los siguientes contenidos:

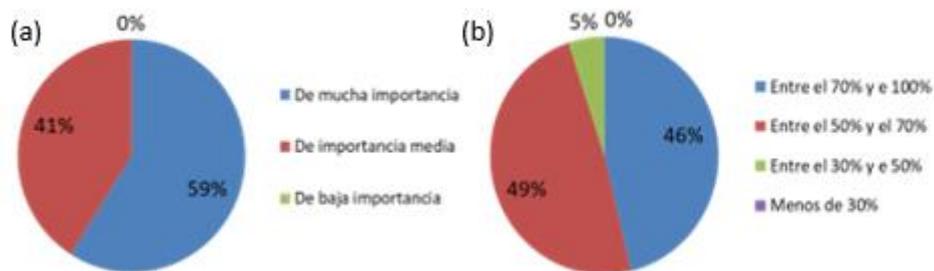
- Definición y clasificación de Tensiones Residuales
- Complejidad en su generación y determinación
- Grados de peligrosidad
- Casos reales de fallas en componentes y estructuras mecánicas

### 3 RESULTADOS Y DISCUSIÓN

Al finalizar la mencionada tercera fase, los alumnos respondieron un cuestionario en forma anónima. Todas y cada una de las respuestas fueron luego recopiladas y analizadas a fin de cuantificar la eficacia del método llevado a cabo.

Entre los resultados más relevantes, se destaca que la totalidad de los alumnos ha coincidido en que el tema Tensiones Residuales tiene una importancia media/alta en su actual etapa de formación, lo cual pudo haber influido en cuanto al nivel de atención advertido durante el desarrollo de dicho tema. La Figura 3 (a) muestra los porcentajes obtenidos. Por otra parte, se comprobó que el 100% de los alumnos consultados manifestó sentirse cómodo con la metodología empleada, y más del 90%, consideró que ha podido incorporar no menos de la mitad de los contenidos propuestos y discutidos, como muestra la Figura 3 (b).

Figura 3. (a) Grado de importancia que otorgan los alumnos al tema desarrollado y (b) porcentaje de los contenidos que los mismos consideran que han incorporado.



Fuente: Brekes Gregoris

En cuanto a las experiencias y conocimientos previos de los alumnos respecto del tema desarrollado, pudo observarse que más del 60% de los mismos desconocía parcial o totalmente dicho tema, como muestra la Figura 4.

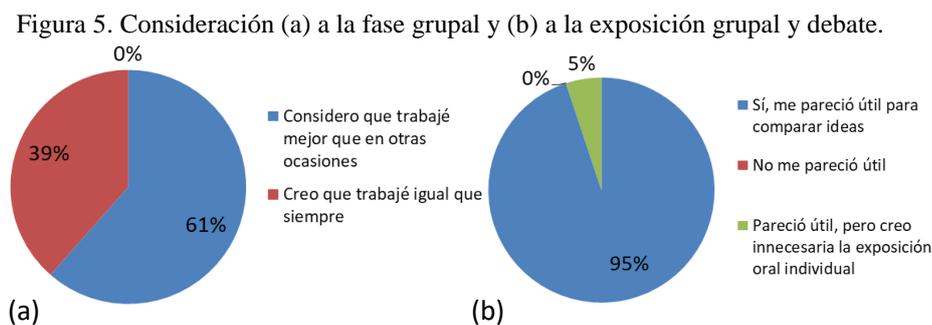
Figura 4. Conocimiento previo del tema desarrollado.



Fuente: Brekes Gregoris

Los resultados obtenidos en las Figura 5 muestran que la fase de trabajo grupal, articulada según la forma propuesta, ha influido positivamente en el desempeño de los

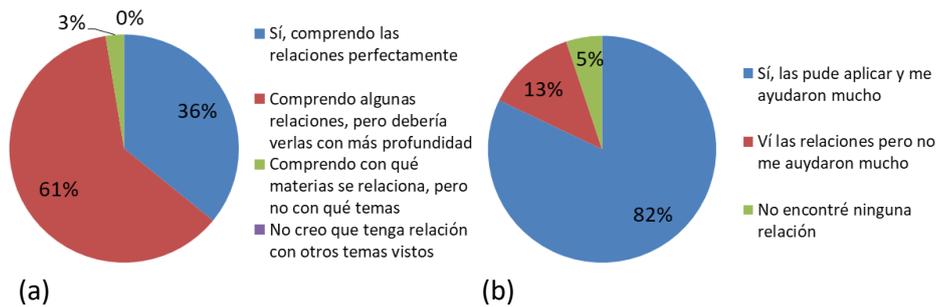
alumnos. Como se puede ver en dicha Figura, más del 60% de los consultados considera que esta forma de trabajo grupal, con formación aleatoria, les ha permitido desempeñarse de manera óptima. Esto último acuerda con la postura de Felder *et al.* [8], en cuanto a las ventajas del trabajo en equipo para la presentación de temas nuevos, donde remarca el beneficio adicional de generar la atmósfera más amena y participativa, a partir de la cual es posible promover el uso de habilidades de comunicación, negociación, liderazgo y consenso. Cabe destacar que, a partir de la aplicación sostenida de una fase colaborativa similar a la propuesta en este trabajo, Felder y Brent [15], Millis y Cottell [16] y Johnson *et al.* [17] han detectado, en una buena cantidad de alumnos, una clara mejoría en aspectos tales como la comunicación, la memoria, el pensamiento crítico, la creatividad en la resolución de problemas, la autoestima, la actitud respecto al objeto de estudio y la predisposición al aprendizaje.



Fuente: Brekes Gregoris

Por otra parte, la Figura 6 (a) muestra niveles aceptables en cuanto a la interrelación de los temas dados con otros contenidos previos, brindados tanto en la presente asignatura como en otras, y la Figura 6 (b), que los alumnos han sido capaces de generar relaciones con otras áreas, fuera de las vinculadas con el ámbito académico.

Figura 6. (a) Relaciones con contenidos académicos previos e (b) interrelación con aprendizajes fuera del ámbito académico.



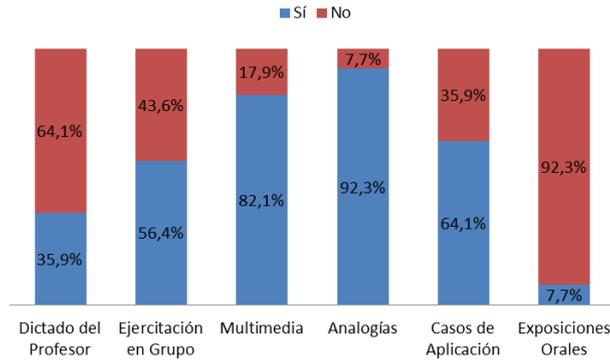
Fuente: Brekes Gregoris

En lo referente a las herramientas didácticas elegidas por los alumnos, pudo observarse que, en líneas generales, coinciden con las empleadas en el desarrollo del presente tema. La Figura 7 muestra cuán apreciadas por los alumnos son las diferentes herramientas didácticas.

De estos resultados se desprende que los alumnos muestran una mayor predisposición al aprendizaje cuando se utilizan estrategias basadas en aspectos sensoriales y visuales, según la categorización de Felder y Silverman [18]. Además, dichos resultados acuerdan con aquellos aportados por Ventura *et al.* [19], en el marco de una investigación con alumnos ingresantes a carreras de Ingeniería.

Por otra parte, la totalidad de los consultados ha señalado que, durante el desarrollo de un tema, deberían ser brindados ejercicios o demostraciones prácticas, a fin de poder participar en las mismas. Esto último habilitaría a redirigir los procesos de enseñanza a modelos tanto activos como adaptativos [5], los cuales han demostrado ser más efectivos que aquellos denominados pasivos o enciclopédicos. Esto sería debido a que la manera natural de adquirir conocimiento y desarrollar destrezas y habilidades es mediante la práctica y la auto reflexión, en lugar del hecho de ver y escuchar a terceros [20]. Si bien resulta claro que el modelo de lectura directa brinda resultados aceptables en el corto plazo, el desarrollo de competencias a largo plazo (creatividad en cuanto al uso de la información, comprensión de modelos y motivación para aprender), solo resulta ser efectivo cuando se propone un método de carácter activo y adaptativo.

Figura 7. Niveles de aprobación de diferentes herramientas didácticas.



Fuente: Brekes Gregoris

En el presente trabajo, la respuesta de los alumnos a la metodología empleada puede ser considerada como satisfactoria. Dicha respuesta posibilita afirmar que la misma incrementa la tendencia a la construcción grupal, y a la comprensión e incorporación de diferentes contenidos, al mismo tiempo que fortalece habilidades y aptitudes tanto lógicas como interpersonales. Finalmente, los resultados obtenidos en este trabajo alientan la utilización y adaptación de la presente metodología a otras áreas de la presente asignatura, y también, de otras correspondientes a la misma carrera.

#### 4 CONCLUSIONES

Este trabajo presenta una metodología de enseñanza activa y secuencial, a partir de la cual se desarrolló el tema Tensiones Residuales correspondiente a la asignatura Estática y Resistencia de Materiales, y también, presenta los resultados de una consulta exhaustiva, a todos y cada uno de los alumnos presentes, acerca de dicho desarrollo. Esta metodología mostró adecuarse, con naturalidad, a los estilos de aprendizaje inherentes a alumnos de carreras de Ingeniería. A partir del empleo de esta metodología fue posible:

- simular una situación laboral, en la cual cada alumno es una parte de un grupo aleatorio cuyo fin es comprender un problema y lograr un objetivo;
  - fomentar el desarrollo de habilidades y aptitudes más allá del pensamiento lógico, las cuales han demostrado ser de interés para el ámbito laboral, tal como: capacidad de trabajo en equipo, adaptabilidad a diferentes situaciones y creatividad en la resolución de problemas, y;
  - mejorar tanto la actitud como la participación de los alumnos, y a su vez, optimizar el ritmo y la dinámica de la clase.
- espacio

Finalmente, para una etapa posterior, se propone extender la presente metodología de enseñanza a otros temas de la mencionada asignatura, realizando previamente las modificaciones necesarias para adaptar la misma a dichos temas. Esto permitiría comparar, a partir de exámenes parciales, el formato tradicional de teoría inicial seguida de trabajo grupal con la actual propuesta, que invierte esta secuencia.

## REFERENCIAS

1. Black, K.M. (1994). *An industry view of engineering education*. Journal of Engineering Education, 83(1): 26-28.
2. Mills, J.E.; Treagust, D.F. (2003). *Engineering education – Is problem-based or project-based learning the answer?* Australasian Journal of Engineering Education, 3(2): 2-16.
3. Godoy, L.A. (2009). *Una revisión del programa de investigación sobre aprendizaje activo en un ambiente simulado desde la perspectiva de la educación en ingeniería*. Latin American and Caribbean Journal of Engineering Education, 3(2): 61-75.
4. Palma, M.; Miñán, E.; De los Ríos, I. (2011). *Competencias genéricas en ingeniería: un estudio comparado en el contexto internacional*. Anales XV Congreso Internacional de Ingeniería de Proyectos, 25-28.
5. 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 of the United States of America, 111: 8410-8415.
6. Rowlands, R.E. (1987). *Residual Stresses*. In: Kobayashi, A.S. (ed.). Handbook on Experimental Mechanics. Prentice-Hall, New Jersey, 768-813.
7. Brekes Gregoris, J.A. (2017). *Propuesta de enseñanza en Ingeniería adaptada a la situación actual*. Memorias de las Jornadas de Jóvenes Investigadores Tecnológicos: JIT 2017, Reconquista, Argentina.
8. Felder, R. M.; Woods, D. R.; Stice, J.E.; Rugarcia, A. (2000). *The future of engineering education*. Chemical Engineering Education, 34(2): 26-39.
9. Nallathambi, A.K.; Kaymak, Y.; Specht, E.; Bertram A. (2008). *Distortion and residual stresses during metal quenching process*. In: Bertram A., Tomas J. (eds). Micro-Macro-interaction. Springer, Berlin, 145-157.
10. Todinov, M.T. (1998) *Mechanism for formation of the residual stresses from quenching*. Modelling and Simulation in Materials Science and Engineering, 6(3): 273-291.
11. Díaz, F.V.; Bolmaro, R.E.; Guidobono, A.P.M.; Girini, E.F. (2010). *Determination of residual stresses in high speed milled aluminium alloys using a method of indent pairs*. Experimental Mechanics, 50(2): 205-215.
12. Díaz, F.V.; Mammana, C.A.; Guidobono, A.P.M. (2017). *Evaluation of residual stresses induced by face milling using a method of micro-indent*s. Research Journal of Applied Sciences, Engineering and Technology, 14(2), 80-85.

13. Wyatt, J.E.; J.T. Berry, J.T. (2006). *A new technique for the determination of superficial residual stresses associated with machining and other manufacturing processes*, Journal of Materials Processing Technology, 171, 132-140.
14. Brekes Gregoris, J.A.; F.V. Díaz, F.V. (2019). *Tensiones residuales: una propuesta metodológica para alumnos de Ingeniería Industrial*. X Congreso Iberoamericano de Educación Científica, CIEDUC 2019, 25-28 marzo de 2019, Montevideo, Uruguay. Enseñanza y Aprendizaje de las Ciencias en debate, vol. 1, 325 – 334.
15. Felder, R.M.; Brent, R. (1994). *Cooperative Learning in Technical Courses: Procedures, Pitfalls, and Payoffs*. Report to the National Science Foundation, North Carolina State University, Raleigh, North Carolina. (ERIC Document Reproduction Service ED 377-038).
16. Millis, B.J.; Cottell, P.G. (1998). *Cooperative Learning for Higher Education Faculty*. American Council on Education. Oryx Press, Phoenix, AZ.
17. Johnson, D.W.; Johnson, R.T.; Smith, K.A. (1991). *Active Learning: Cooperation in the College Classroom*. Interaction Book Co., Edina, MN.
18. Felder, R.M.; Silverman, L.K. (1988). *Learning and teaching styles in engineering education*. Engineering Education, 78(7): 674–681.
19. Ventura, A.C.; Palou, I.; Széliga, C.; Angelone, L. (2014). *Estilos de aprendizaje y enseñanza en ingeniería: una propuesta de educación adaptativa para primer año*. Educación en Ingeniería, 9(18): 178-189.
20. Haile, J.M. (1998). *Toward technical understanding part 3. Advanced levels*. Chemical Engineering Education, 32(1): 30–39.