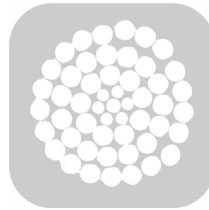


Desarrollo de pruebas de comportamiento en cables ACSR / AS



Colaboración

Julio César Méndez Gutiérrez; Miguel Ángel Esquivel Sánchez; Fernando Jurado Pérez, Tecnológico Nacional de México / campus Irapuato

Fecha de recepción: 19 de marzo de 2024

Fecha de aceptación: 3 de junio de 2024

RESUMEN: La investigación se centra en los esfuerzos térmicos y electromecánicos combinados del comportamiento del cable ACSR / AS destacando la prueba a la tensión mecánica y su comportamiento térmico-mecánico como parte de la revisión de una de las líneas de transmisión aéreas del país. En donde se analiza los diferentes factores que determinan su capacidad térmica, además del esfuerzo deformación del cable resaltando algunos fenómenos que se pudieran presentar debido a las temperaturas, la cristalización y el creep en la determinación de la influencia en el límite térmico, así como la determinación de la tensión de rotura y el comportamiento de la flecha. El uso de este tipo de cables y su aplicación se utiliza en tramos largos como conductores de tierra y de fase debido a su alta relación de resistencia mecánica, presentando una buena capacidad de cargabilidad. Por consiguiente, la temperatura del conductor normalmente está influenciada por la cargabilidad de la línea y de las condiciones climáticas. Lo cual no solo se relaciona directamente con la máxima corriente que pueda circular por el conductor a su vez también por el límite térmico.

PALABRAS CLAVE: Cable, pruebas, mecánicas, límite térmico, flecha y creep.

ABSTRACT: The research focuses on the combined thermal and electromechanical stresses of the behavior of the ACSR / AS cable, highlighting the mechanical stress test and its thermal-mechanical behavior as part of the review of one of the country's overhead transmission lines. Where the different factors that determine its thermal capacity are analyzed, in addition to the deformation stress of the cable, highlighting some phenomena that could occur due to temperatures, crystallization and creep in determining the influence on the thermal limit, along with the determination of breaking stress and arrow behavior. The use of this type of cables and their application is used in long sections as ground and phase conductors due to their high mechanical resistance ratio, presenting a good load capacity. In consequence, conductor temperature is normally influenced by line loadability and weather conditions. In addition, directly related to the maximum current that can flow through the conductor, but also to the thermal limit.

KEY WORDS: Tests, Cable, resistance, mechanical, thermal, conductor, electrical behavior.

INTRODUCCIÓN

El análisis del comportamiento en cables para líneas de transmisión subterráneas y aéreas debe de estar sometido a un conjunto de pruebas mecánicas, térmicas para garantizar el funcionamiento de este tipo de cables instalados en las líneas de transmisión. La investigación aborda la temática del análisis de pruebas en cables tipo ACSR / AS, basada en las normativas de la Comisión Federal de electricidad CFE, en donde algunas de las Normas que destacan se presentan tales como

CFE-E000016, NOM-J-142, conjuntamente con las normas internacionales, IEEE, IEC (AIEC y AIECCS6). Mediante el desarrollo de pruebas mecánicas, térmicas y la revisión del presente Cable ACSR / AS calibre 477 HAWK/AS, y tensión de ruptura nominal TRN de 84kN, que destacando dentro de la especificación CFE E0000-18-2013 Especificación CFE-E 1000-12 [1].

Inspección Visual

La inspección destaca la revisión del cable recorriendo la línea a través de la trayectoria en busca de daño visiblemente observable durante su instalación o su puesta en servicio, conjuntamente en la revisión de sus accesorios los cuales estén debidamente instalados. En la Figura 1 se puede observar una perspectiva de una línea de transmisión LTs observándose herrajes y aisladores típicos en líneas.

Asimismo, de la inspección se verifican las condiciones de la línea (cable) mediante la identificación de las terminales del circuito, el registro de empalmes, y las conexiones a tierra. Destacando que visualmente no se debe encontrar ninguna desviación de la construcción de las líneas. Aunado a la verificación dimensional, física, conexiones a tierra, soportes de la línea etc.



Figura 1. Perspectiva de una LTs.
Fuente: Elaboración propia.

Del desarrollo de pruebas y del análisis de estudio de las LTs las pruebas eléctricas son complemento de las mecánicas, térmicas, químicas etc. No obstante, el enfoque de la presente investigación destaca las pruebas mecánicas y térmicas.

MATERIAL Y MÉTODOS

El análisis del presente cable Hawk/AS ACSR/AS se realiza como pruebas de desarrollo y de procedimientos de pruebas de campo en donde se analizaron algunas muestras del cable conductor, iniciando con este

protocolo de pruebas que a continuación se describe. Para poder determinar las características del cable se realizaron las pruebas de comportamiento mecánico, resistencia a la tensión mecánica, es importante destacar las cualidades del análisis del cable compuesto de alambres de aluminio 1350 desnudo en temple duro "H19", con núcleo central compuesto de alambres de acero recubierto de aluminio soldado [2].

Dentro del protocolo, su seguimiento, aplicación se describe a continuación, con el equipo de pruebas que comprende de una fuente de corriente alterna, mediante la cual se inyecta una corriente inicial de 300 A registrando la temperatura hasta que esta se estabiliza de tal forma poder escalar la corriente en saltos de 150 A siendo el primer en 300, 450, y llegar a 600 A, Considerando que, desde el punto de partida del ensayo se aplica mecánicamente una tensión inicial en el conductor de 16240 N que representan el 19.3% de la TRN como lo describe la normativa, esta maniobra se logra mediante un brazo de palanca y con pesos muertos, y se analiza el monitoreo de la flecha y de LA temperatura en el conductor [3].

En la Figura 2 se muestra cómo se estabiliza la temperatura, una vez que esta es inyectada al conductor Hawk/AS ACSR/AS destacando el análisis de los termopares, para esta prueba la utilización de estos se clasificó como C4, C7, C8 y C9 como la temperatura para cada uno de ellos y C3 se designó como la corriente programando un valor de 0, 150 hasta llegar a los 600 amperes.

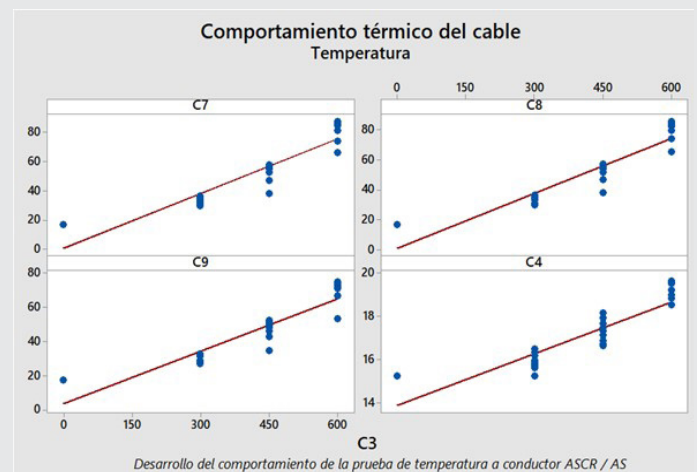


Figura 2. Comportamiento térmico de los termopares.
Fuente: Elaboración propia.

Como se describió previamente el proceso de inyección de corriente en conductores con una calibración previa en 300 A, y saltos de 150 A. Asimismo, En la Figura 3 permite visualizar el comportamiento de los termopares C5, C7, C8, C9 y C10 vs t a lo largo de la prueba se observa el comportamiento en los termopares.

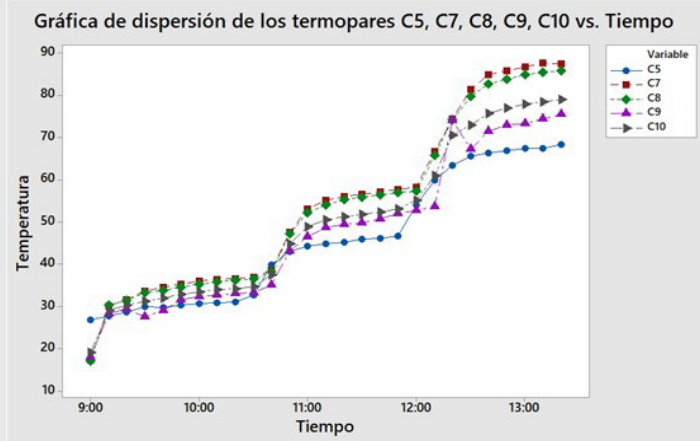


Figura 3. Gráfica de la dispersión de los termopares versus tiempo de prueba del cable.

Fuente: Elaboración propia

En el análisis del comportamiento de un conductor mediante una línea de transmisión es importante conocer el comportamiento de la flecha teniendo los criterios de diseño considerando que los conductores eléctricos están expuestos a esfuerzos mecánicos y térmicos los cuales están representados en ciclos térmicos estos se presentan durante la operación. En la Figura 4 se presenta una imagen del comportamiento de la flecha en este caso, se tomaron los termopares C9, C10, C11, la temperatura vs deformación del conductor [4].

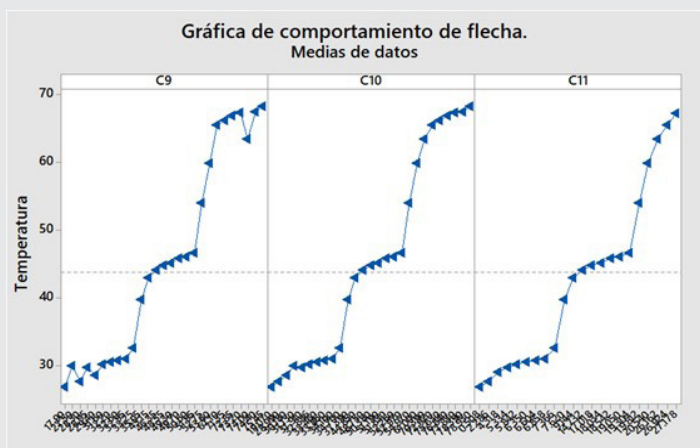


Figura 4. Gráfica del comportamiento de Flecha.

Fuente: Elaboración propia.

Lo cual recae en una mayor elongación como respuesta a la acción de la temperatura y por el mismo esfuerzo combinado lo cual implica una disminución en la TRN. El estudio del análisis y del protocolo de pruebas se tiene a desarrollar el circuito de operación para el cable Hawk/AS ACSR/AS. En el orden del circuito de pruebas cabe destacar la precisión y seriedad de cada uno de los detalles dentro del arreglo. Es importante recordar que durante la operación de la línea los conductores se ven afectados por estos cambios de temperatura y que debido a esto se ve afectado el valor de la longitud es aquí donde radica la importancia de la

medición de la flecha. En la Figura 5 se puede apreciar dos imágenes las cuales muestran el arreglo para la medición de la flecha [5].

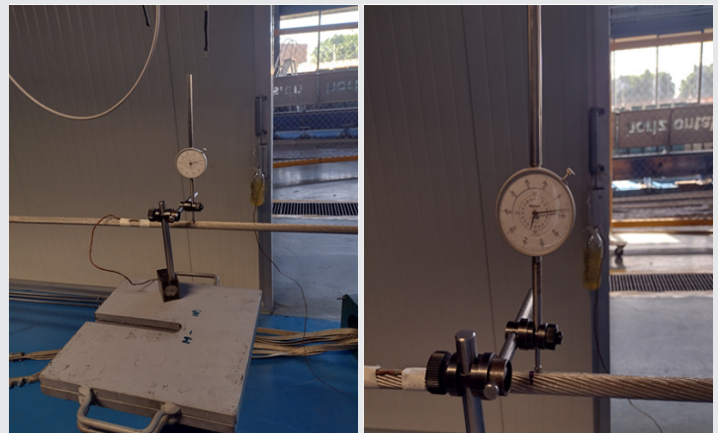


Figura 5. Lectura de la medición de la flecha durante la prueba.

Fuente: Elaboración propia.

Simultáneamente inmerso en el protocolo de pruebas se implementa el circuito de estudio de termo-mecánica, en donde es importante enfatizar que el conductor sufre una severa deformación elástica cuando se le aplica un esfuerzo mecánico. En la Figura 6 se observa dos imágenes de la prueba termo-mecánica. Como es conocido una vez que un conductor se elonga debido a una tensión este permanece así, aun que una vez que esta tensión desaparece el cable no regresa a su estado previo por lo cual el cable conductor sufrió una elongación, es aquí en donde se origina el concepto de la prueba de Creep la cual se utiliza para definir la deformación plástica que presenta el cable a mantener la carga sostenida en ciertos periodos de tiempo.



Figura 6. Arreglo de prueba para esfuerzos térmicos.

Fuente: Elaboración propia.

RESULTADOS

Con base a la información se determinó las características del cable, realizando pruebas de comportamiento mecánico, resistencia a la tensión mecánica, obteniéndose resultados significativos: un perfil de conductor ACSR/AS, con los siguientes datos de operación, una

ampacidad hasta 660 Amperes y una temperatura de 75°C.

Los resultados obtenidos en las pruebas de resistencia a la tensión con grapas tipo pistola indican que puede soportar una carga en el rango de 51340 N y hasta 60570 N, presentando una resistencia al orden del 61.13 al 72.1% a la resistencia que debiera presentar el conductor en donde el valor máximo es 84KN, es importante destacar que el cable puede soportar una mayor resistencia a la tensión para lo cual se deberán de implementar grapas de tensión-compresión [6].

En la verificación del comportamiento termo-mecánico se implementaron ensayos con la finalidad de determinar el comportamiento de la flecha la cual puede experimentar el cable con variables en la aplicación de la corriente, con carga mecánica constante y monitoreo la respuesta de la temperatura, obteniéndose una deformación dentro de los parámetros establecidos para determinar la flecha, en las pruebas este cable mostro una resistencia mayor a la esperada, y en el flujo de corriente, reflejándose directamente en la temperatura, la cual presentó valores por arriba de los 75°C, es decir con 600A de corriente el conductor registro un rango de temperaturas de hasta 80.57 °C determinándose que al encontrarse por encima de la temperatura de diseño el valor máximo de ampacidad seria al orden de los 550 A permisibles del conductor en las condiciones presentada.

Los resultados de los análisis previamente descritos conllevan a destacar que una línea de transmisión a mayor tiempo de operación se somete a los esfuerzos térmicos y mecánicos combinados debido a que los esfuerzos y efectos sobre el conductor son mayores [7].

En la Figura 7 Se destaca la puesta de la prueba de resistencia a la tensión.



Figura 7. Arreglo de prueba para TRN.
Fuente: Elaboración propia.

Según el análisis matemático del comportamiento de flecha vs temperatura se describe a continuación. Destacando el análisis de relación de la flecha y temperatura el cual se mostró lineal como se observó en las Figuras iniciales. Mediante la Ec 1 se puede determinar analíticamente el cambio de estado del cable. La Ec 2 se tomó en consideración en la longitud del cable, en este sentido de manera más concreta en LTS.

$$L_2 = L_1 \left(1 + \alpha(t_c - t_{c0}) + \frac{T_2}{E \cdot a} \right) \quad \text{Ec 1}$$

Para la ecuación de la longitud esta la Ec 2, y en las tensiones aplicadas con la Ec. 3

$$L = \frac{2H}{w} \sinh\left(\frac{ws}{2H}\right) \quad \text{Ec 2}$$

Las tensiones aplicables por definición:

$$T_{ef} = \frac{wx}{2} \left[\frac{H}{wx} \cosh\left(\frac{wx}{H}\right) + \frac{1}{\sinh\left(\frac{ws}{2H}\right)} \right] \quad \text{Ec 3}$$

Del cambio de temperatura en el análisis previo del protocolo de prueba al cable y debido a las deformaciones a las que se someten lo cual genera una elongación, la Ec. 4 se usó para este caso específico.

$$D = y = \frac{H}{W} \left(\cosh\left(\frac{ws}{2H}\right) - 1 \right) \quad \text{Ec 4}$$

Los limites térmicos de operación de las líneas de transmisión se contemplaron y se consideró, donde se remarque las propiedades del conductor, así como sus bondades del módulo de elasticidad el cual se ve desarrollado por la ecuación previa y asimismo la tensión de rotura nominal TRN en consecuencia a los ciclos térmicos y la temperatura de operación de la LTs. En la Figura 8 se presenta una perspectiva del tendido del cable en el laboratorio en donde se simula la LTs [8].



Figura 8. Perspectiva del tendido de la LTs en laboratorio para la prueba de TRN.
Fuente: Elaboración propia.

Durante el desarrollo de pruebas realizado por el protocolo al cable ACSR / AS, se presenta la siguiente fractura del objeto bajo prueba (OBP) [9].



Figura 9. Zona de fractura del OBP.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 10 se muestra la gráfica de tensión residual con una carga máxima de 60570 N en donde se destaca una caracterización completa del cable ACSR / AS.

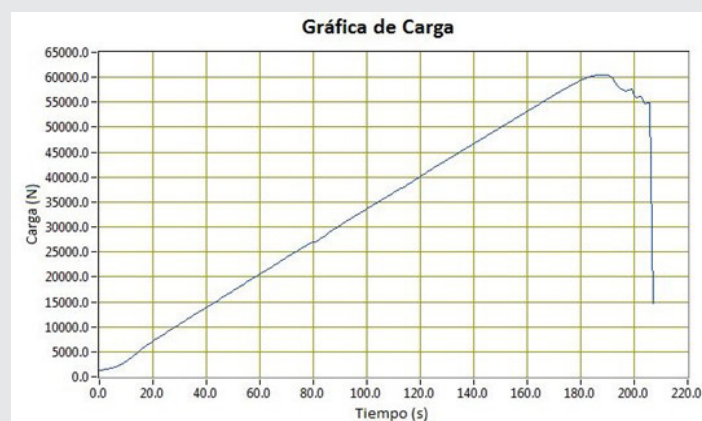


Figura 10. Gráfica de la tensión residual aplicada al conductor cable ACSR / AS.

Fuente: Elaboración propia.

En la Figura 11 se observa la gráfica de tensión residual, pero con una carga máxima 51340 N que de igual forma es destacable la caracterización completa del cable ACSR / AS.



Figura 11. Gráfica de la TRN con 51340N al conductor cable ACSR / AS.

Fuente: Elaboración propia.

CONCLUSIONES

En base a los resultados obtenidos de pruebas realizadas se concluye que el conductor bajo análisis tiene las características para ser calificado como un cable conductor ACSR/AS, el conductor contiene características electromecánicas limitadas para este tipo de cable, es decir tiene una resistencia a la tensión de ruptura en el rango de 51 350 N y hasta 60 580 N, cabe mencionar que dependerá del herraje de sujeción que se utilice podrá aumentar su capacidad de resistencia mecánica. Aunado a que los herrajes-grapa tipo pistola utilizados en las pruebas, contribuye en una concentración de esfuerzos en los alambres de las coronas de aluminio, delimitado a una menor resistencia a la tensión mecánica.

Desde otro punto de vista y conforme al comportamiento obtenido mediante las pruebas electromecánicas, se concluye que el conductor puede trabajar con una máxima ampacidad del orden de los 600 A, esto derivado del desempeño térmico registrado del cable en los diferentes saltos de corriente, es decir, la temperatura de trabajo recomendable de la referencia de CFE para este tipo de cable conductor es del orden de los 75°C, las cuales fueron registradas en el escalón de los 600 A siendo el 90% de su ampacidad.

BIBLIOGRAFÍA

[1] "Especificación CFE 2C-301-15, Editada en Nov 2020".

[2] X. Ma, L. Gao, J. Zhang, and L. C. Zhang, "Fretting wear behaviors of aluminum cable steel reinforced (ACSR) conductors in high-voltage transmission line," *Metals (Basel)*, vol. 7, no. 9, Sep. 2017, doi: 10.3390/met7090373.

[3] P. H. C. Rocha, J. I. M. Díaz, C. R. M. Silva, J. A. Araújo, and F. C. Castro, "Fatigue of two contacting wires of the ACSR Ibis 397.5 MCM conductor: Experiments and life prediction," *Int J Fatigue*,

vol. 127, pp. 25–35, Oct. 2019, doi: 10.1016/j.ijfatigue.2019.05.033.

[4] I. M. Andrés Vázquez Juárez, “BENEMÉRITA UNIVERSIDAD AUTÓNOMA DE PUEBLA.”

[5] R. A. Meyberg, F. M. Absi Salas, L. A. M. C. Domingues, M. T. Correia de Barros, and A. C. S. Lima, “Experimental study on the transformer effect in an ACSR cable,” *International Journal of Electrical Power and Energy Systems*, vol. 119, 2020, doi: 10.1016/j.ijepes.2020.105861.

[6] S.-I. Ao, L. Gelman, D. W. L. Hukins, and International Association of Engineers, *World Congress on Engineering : WCE 2016 : 29 June - 1 July, 2016*, Imperial College London, London, U.K.

[7] P. O. Kwasi Anane et al., “Traveling wave arrival time detection for two-terminal non-contact measurement based on short time matrix pencil scheme,” *Electric Power Systems Research*, vol. 205, 2022, doi: 10.1016/j.epsr.2021.107747.

[8] F. Lévesque, S. Goudreau, A. Cardou, and L. Cloutier, “Strain measurements on ACSR conductors during fatigue tests I - Experimental method and data,” *IEEE Transactions on Power Delivery*, vol. 25, no. 4, pp. 2825–2834, Oct. 2010, doi: 10.1109/TPWRD.2010.2060370.

[9] R. Fernández Vásquez, “Desempeño mecánico de montajes de líneas de distribución de energía eléctrica Mechanical Performance of Electric Power Distribution Line Mounting.”

