

MODELIZACIÓN Y OPTIMIZACIÓN POR EL MÉTODO DE ELEMENTOS FINITOS DE UN CAPTOR ELECTROMAGNÉTICO PARA LA EVALUACIÓN DE LA TRANSFORMACIÓN DE FASES EN EL ACERO

MODELIZATION AND OPTIMIZATION BY THE METHOD OF FINITE ELEMENTS OF AN ELECTROMAGNETIC DETECTOR THE EVALUATION OF THE PHASE TRANSFORMATION IN THE STEEL

Ronald Surco*

RECIBIDO: 23/05/2014 – APROBADO: 09/06/2014

RESUMEN

La primera parte de esta investigación sintetiza la información bibliográfica sobre captosres electromagnéticos, haciendo un énfasis sobre el modelo de captor "PhaseTrack". En este mismo capítulo se trata sobre el fundamento metalúrgico de la transformación de fases en los aceros. La austenita es una fase no magnética; por el contrario, la ferrita es una fase altamente magnética.

Una segunda parte de esta investigación trata fundamentalmente sobre la modelización numérica del captor electromagnético PhaseTrack, haciendo uso del programa Flux 3D, con el cual se ha descartado los modelos analíticos existentes sobre la determinación de la permeabilidad del acero debido a que los resultados del modelo analítico fueron muy alejados de los resultados experimentales.

Seguidamente se hace una validación del modelo numérico con la experiencia hecha utilizando un prototipo de captor del mismo tipo, respetando todas las condiciones físicas impuestas en la modelización numérica. Los resultados de esta validación indican que el modelo es válido, con una diferencia mínima de inducción magnética entre el modelo teórico y experimental. La parte final de esta investigación está dedicada a la optimización del mismo captor, haciéndolo más sensible a la señal magnética y prediciendo las modificaciones geométricas de este captor para tener resultados óptimos en la evaluación de la transformación de fases.

Palabras clave: Optimización, aceros, fases.

ABSTRACT

The first part of this research synthesizes bibliographic information on electromagnetic sensors with the emphasis on the electromagnetic captor Phase Track. This chapter also deals with the basic metallurgical phase transformation of steels, considering that the austenite is a non-magnetic phase, contrary to the highly magnetic ferritic phase. A second part deals mainly with numerical modeling of the electromagnetic captor Track Phase using Flux 3D software where the existing analytical models determining the permeability of steel have been ruled out because the results are very far from the numerical model and therefore from the experimental results.

Thereafter, a validation of the numerical model with the experiment made with a sensor prototype of the same model, respecting all the physical conditions imposed on the numerical modeling is made. The results of this validation show that the model is valid, with a minimum difference of magnetic induction between the numerical model and the experimental results. The final part of this research is devoted to the optimization of the captor, making it more sensitive to the magnetic signal and predicting the geometrical modifications of the captor for optimal results in the evaluation of the transformation phase.

Keywords: Optimization, steel, phase.

* Centre Recherche de Procédés d'ArcelorMittal à Maizières Université de Lorraine à Nancy – France. E-mail: ronalsurco3@gmail.com

I. INTRODUCCIÓN

Las propiedades mecánicas del acero dependen en gran medida de la fase microestructural presente en el acero (Waeckerle, 2008). La velocidad de enfriamiento es un factor importante en la operación metalúrgica de laminado en caliente, ya que este define la transformación de fases en la placa de acero. Las diferentes fases estructurales que se producen a partir del enfriamiento de la fase austenítica son: la austenita, la ferrita, la perlita, la bainita y la martensita donde esta transformación es influenciada con la composición química. La velocidad de enfriamiento se controla a través de toberas de propulsión de agua hacia la placa de acero. El control del proceso general de laminado es delicado y, por tanto, es necesario disponer de un método preciso y práctico para caracterizar las diferentes fases presentes en dicha placa.

En la industria actual existen diferentes métodos de evaluación de la transformación de fases, pero no todos se pueden utilizar en líneas de producción, ya que son métodos indirectos, tales como la inferencia de la medida de temperatura; algunos son destructivos (necesitan pequeñas cantidades de muestra) como la metalografía óptica, el microscopio electrónico de barrido, la difracción de Rayos X y el dilatómetro.

Cada fase constituyente del acero tiene un comportamiento diferente en cuanto a la inducción magnética.

En este estudio tratamos un captor electromagnético para evaluar la permeabilidad relativa del acero y luego caracterizar el estado del material según las fases presentes.

El seguimiento de la transformación de fase por este método tiene ventajas muy interesantes. Una de estas ventajas es la caracterización "in situ" del acero debido a que el método de control es no destructivo (CND). Además, este método puede funcionar incluso cuando el material es dinámico.

En ArcelorMittal actualmente existen los medios para aplicar esta nueva tecnología de evaluación haciendo uso de captosres electromagnéticos denominados PhaseTrack. La modelización numérica por el método de elementos finitos de dichos captosres proporciona resultados más próximos a los resultados experimentales.

Esta modelización y su respectiva simulación se realizan utilizando el programa Flux 3D, con el que se estudian las propiedades magnéticas de todo el sistema del captor PhaseTrack. La simulación numérica sirve también para evaluar la influencia de los diferentes factores que intervienen en el sistema para una posterior optimización del proceso y evitar gastos indebidos en estudios experimentales.

II. ANTECEDENTES BIBLIOGRÁFICOS

Las informaciones bibliográficas se basan sobre una previa descripción del captor electromagnético PhaseTrack y la transformación de fases en los aceros.

2.1. Captor electromagnético phasetrack

El captor electromagnético PhaseTrack (Magnac, 2010) es un modelo muy parecido a lo estudiado por los autores, Papaelas M.P. (Papaelas, 2004). El mencionado captor tiene un polo positivo y dos polos negativos de recepción del campo emitido por el polo positivo, con dichas medidas se determinan la permeabilidad relativa del acero. Ver Figura N° 1.

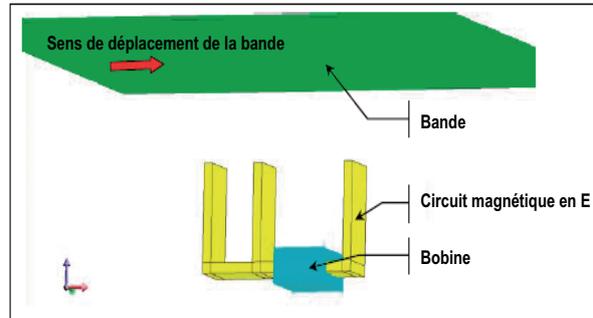


Figura N° 1. Esquema inicial del sistema de captor PhaseTrack.

El modelo numérico basado en el principio de elementos finitos realizados en una primera parte cuenta con resultados más precisos y próximos a los experimentales. Los resultados nos sirven para evaluar el impacto de la separación de la placa de acero y determinar su permeabilidad relativa.

La utilización a nivel de laboratorio y uso industrial del captor PhaseTrack está entre los cilindros de rodamiento de la mesa de enfriamiento conectado a la banda de acero, para el estudio de transformación de fases.

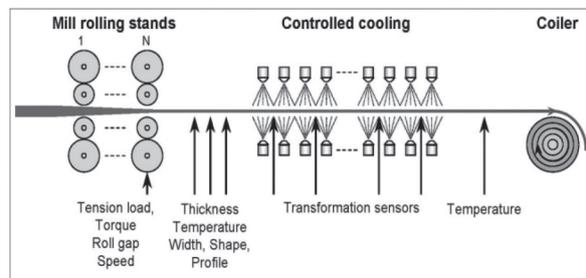


Figura N° 2. Diagrama esquemático de la parte final del proceso de laminado.

La utilización industrial en el futuro está proyectada una vez que los parámetros del modelo estén regulados.

2.2. Transformación de fases en los aceros

Las comunes fases presentes en la estructura de un acero al carbono son: la ferrita, la perlita, la bainita y la martensita. La morfología y la cantidad de cada fase depende de los ajustes de la composición química y la velocidad de enfriamiento (Denis, 2012).

La composición química del acero es un factor importante para la transformación de fases, especialmente la presen-

cia de carbono, diagrama Fe - C y el efecto de la velocidad de enfriamiento, tal como el diagrama de transformación de enfriamiento continuo o TCC (Transformación Cooling Continuous) (Dickinson, 2007). Ver Figura N° 3.

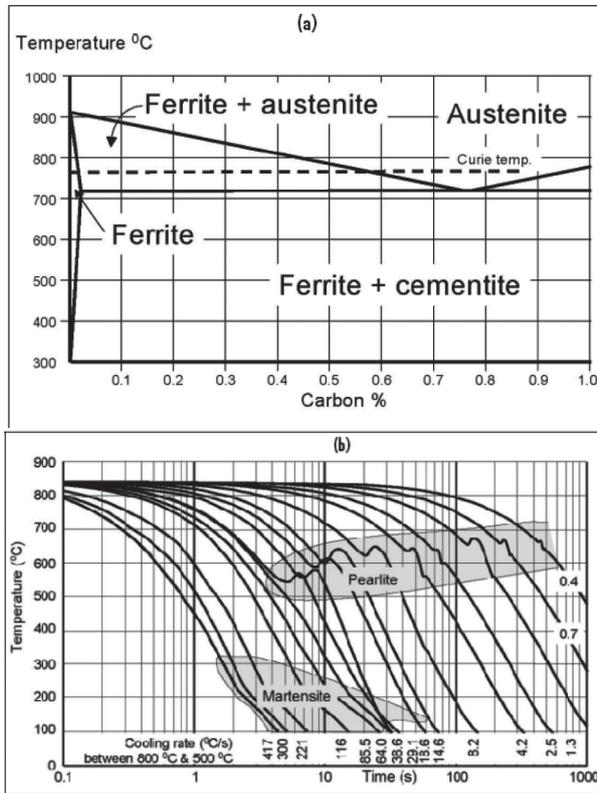


Figura N° 3. Diagrama (a) Fe-C (b) Transformación a enfriamiento continuo (TCC) (0.74% de acero C)

Es necesario construir un camino térmico exacto para predecir la microestructura del producto final, haciendo correcciones en el modo de enfriamiento. Y justamente es en esta parte que tiene una función adecuada el captor electromagnético en estudio, que sirve de indicador para los diferentes ajustes de la velocidad de enfriamiento.

III. MODELIZACIÓN NUMÉRICA DEL CAPTOR ELECTROMAGNÉTICO PHASETRACK

En el caso de este estudio científico se hace un amplio desarrollo del modelo numérico basado en el principio de elementos finitos, utilizando el programa Flux 3D. El principio de cálculo del programa Flux 3D está basado en una serie de cálculos infinitesimales, haciendo una serie de iteraciones e integrando múltiples resultados como de la inducción magnética (Surco, 2013).

El esquema general de captor PhaseTrack se muestra en la Figura N° 4.

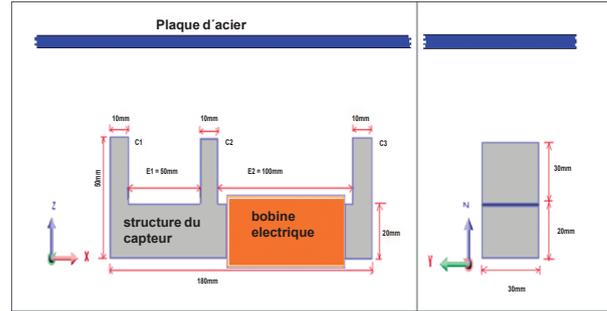


Figura N° 4. Esquema general del sistema del captor PhaseTrack.

3.1. Resultado del análisis numérico utilizando el programa flux 3d

Un resultado del análisis de la inducción magnética en la estructura del captor se muestra en la Figura N° 5.

La inducción magnética máxima corresponde a 700 mT, este valor se encuentra en la parte central de la bobina eléctrica. La inducción magnética va disminuyendo a medida que las líneas de campo se alejan de la bobina eléctrica.

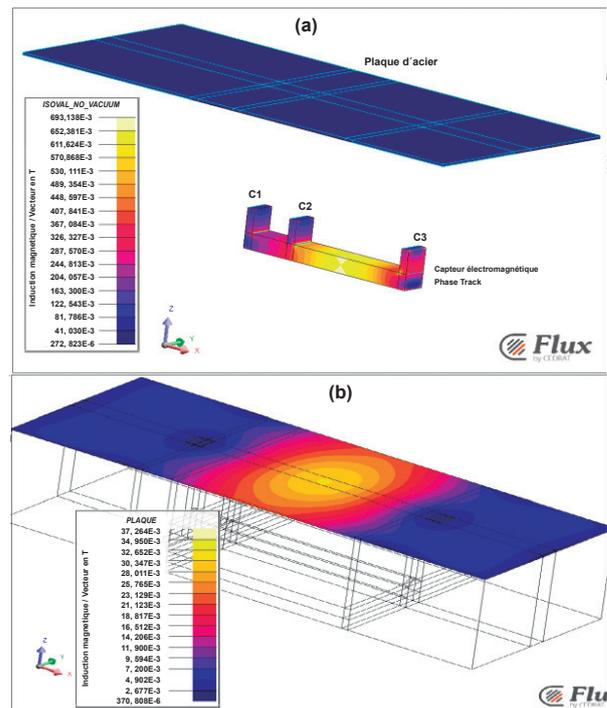


Figura N° 5. La inducción magnética de a) estructura del captor, b) placa de acero, a una distancia de separación placa de 50 mm y una permeabilidad relativa de la placa de acero de 50.

En consecuencia, el comportamiento direccional de las líneas de campo magnético de todo el sistema se muestra en la Figura N° 5(a) y 5(b).

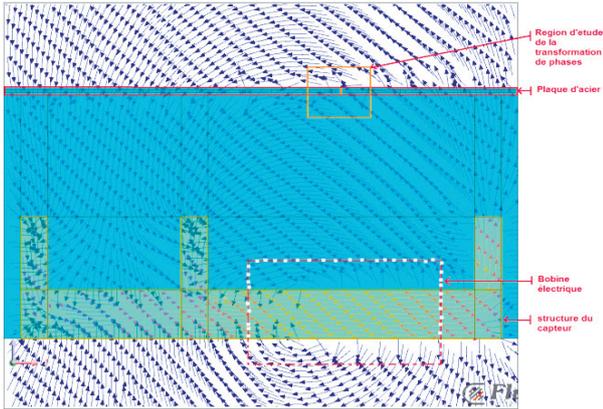


Figura N° 6. Distribución del vector de inducción magnética alrededor del captor y en la región de estudio correspondiente a la transformación de fases.

Las líneas de campo magnético generadas del polo 3 parten en diferentes direcciones. La mayor parte de estas traspasan la placa de acero, otras siguen la dirección de la placa y las restantes no llegan a tocar la placa, y pasan directamente a los polos 1 y 2. Los polos 1 y 2 se encargan de recibir la señal en unidades de inducción magnética tesla (T). Ver Figura N° 6.

3.2. Efecto de las fases presentes sobre las propiedades magnéticas de la placa de acero

Es necesario conocer el comportamiento magnético de la placa de acero, que consta básicamente de una mezcla de fases. Este mismo efecto no se cumple cuando se trata de material monofásico como se ha estado considerando anteriormente.

3.2.1. Propuesta de ciertas distribuciones de fase en la placa de acero

Los diversos casos estudiados se muestran en la Tabla N° 1.

Tabla N° 1. Distribución de diferentes fases en la placa de acero.

Cas	Description	schema de phases
Reference	Monophase	une seule phase mais avec différentes perméabilités
1	Austenite-ferrite	austenite couche extérieur et ferrite au milieu
2	Austenite-ferrite	austenite couche extérieur et ferrite coupe au milieu
3	Austenite-perlite-ferrite	austenite couche extérieur, ferrite et perlite coupées au milieu
4	Austenite-ferrite	ferrite couche extérieur, austenite au milieu
5	Austenite-perlite-ferrite-martensite	martensite couche extérieur et ferrite, austenite et perlite coupées au milieu

■ Monophase
 ■ Austenite
 ■ Ferrite
 ■ Perlite
 ■ Martensite

Para este análisis se estima un espesor de placa de 3 mm y una separación de placa de 50 mm. La permeabilidad de las diferentes fases metalúrgicas se muestra en la Tabla N° 2:

Tabla N° 2. Permeabilidad magnética de las diferentes fases del acero.

Phase	Perméabilité magnétique	Description
Austénite	1	non ferromagnétique
Ferrite	100	ferromagnétique
Perlite	50	moyenne ferromagnétique
Martensite	20	faible ferromagnétique

El resultado del caso de referencia, acero monofásico ideal constituido de ferrita, se muestra en la Figura N° 7.

En dicha figura se puede apreciar cómo las líneas de campo magnético llegan a la fase ferrítica alineándose según la dirección X de la placa, en relación con la intensidad presente en el trayecto.

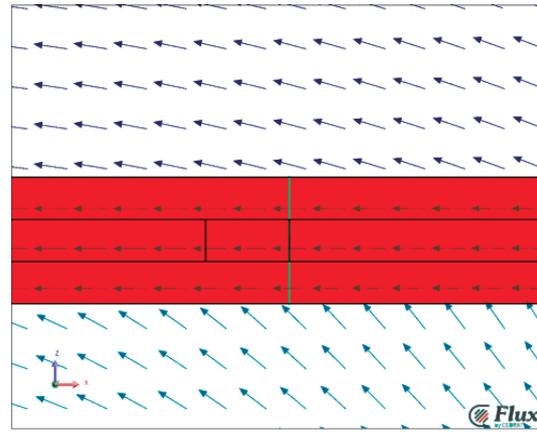


Figura N° 7. Comportamiento de las líneas de campomagnético de la ferrita en el punto central entre polos 2 y 3, con una permeabilidad magnética de 100 y una separación de placa de acero de 50 mm.

3.2.2. Comparación de la inducción magnética entre diferentes formas de distribución de fases en la placa de acero.

Un resultado de la inducción magnética entre los diferentes casos estudiados se muestra en la Figura N° 8. Es evidente que la influencia de la presencia de la ferrita sea fundamental, debido al aumento de densidad de flujo magnético en el acero.

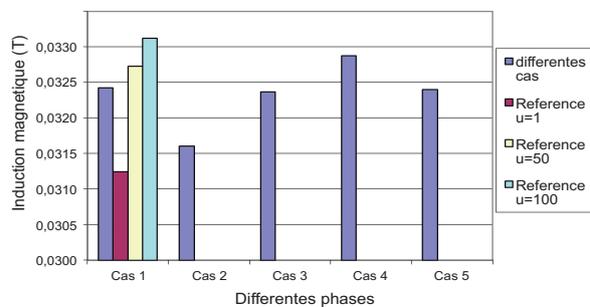


Figura N° 8. Comparación de la inducción magnética entre los diferentes casos y el de referencia con diferentes permeabilidades.

La presencia de la fase austenítica con una permeabilidad de 1 tiene un comportamiento opuesto en relación con la ferrita, que cuenta con 100 de permeabilidad magnética.

IV. VALIDACIÓN DEL MODELO NUMÉRICO CON RESULTADO EXPERIMENTAL

La medición experimental se realiza en el laboratorio de medida y control de ArcelorMittal - Maizieres del prototipo del captor se muestra a continuación en la Figura N° 9.

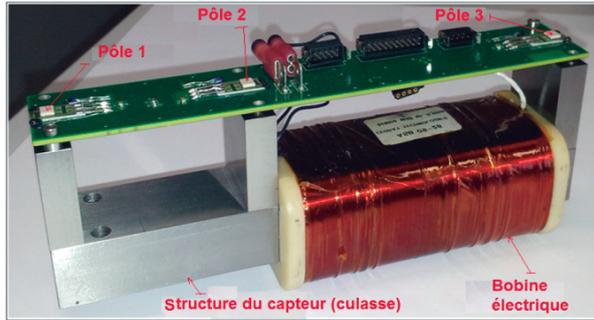


Figura N° 9. Prototipo del captor PhaseTrack.

Este captor mide la inducción magnética en los diferentes polos obedeciendo el principio físico de efecto Hall.

4.1. Comparación de los resultados del modelo numérico y experimental

La permeabilidad magnética de la placa de acero es 50 según los informes de producción (N° 125115/MO8029-2 bobina, planta ArcelorMittal Florange).

Los resultados del estudio numérico y experimental se muestran en la siguiente Figura N° 10.

Existe un acuerdo entre el valor experimental «exp» y el calculado por Flux 3D como «mod».

El modelo es aceptable, ya que existe una diferencia de desviaciones entre la experiencia y el modelo teórico de 5%, sabiendo de antemano que las medidas experimentales son muy sensibles. Con lo que se puede concluir que la validación del modelo ha sido realizada con éxito.

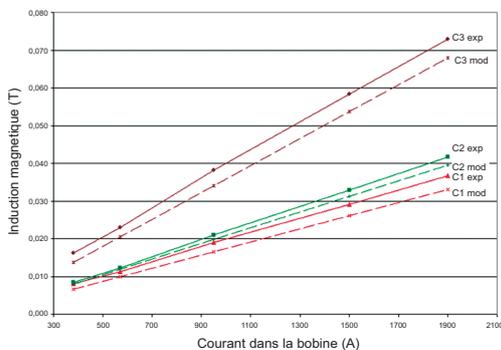


Figura N° 10. La inducción magnética en función de corriente total en la bobina para una imantación a saturación de la estructura de 1.7T y una permeabilidad de la estructura de 1,000.

V. LA OPTIMIZACIÓN DEL CAPTOR ELECTROMAGNÉTICO PHASETRACK

Una optimización del captor es hacer una modificación de su estructura y de la forma de cabeza de los polos en paralelepípedos. Dicha modificación se muestra a continuación.

5.1. Modificación de la longitud y de cabeza de polo de la estructura del captor

La modificación de la geometría del captor es detallada en la Figura N° 11.

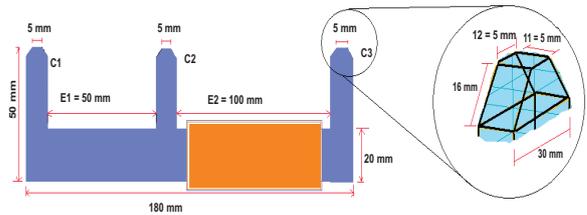


Figura N° 11. Esquema de modificación de la longitud de estructura y de la forma de cabeza de polo del captor PhaseTrack.

Las condiciones físicas consideradas en este cálculo son:

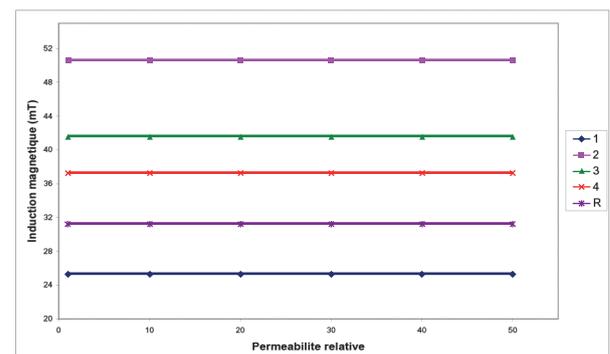
Permeabilidad μ de 1, 10, 20, 30, 40 y 50 con una distancia de separación de la placa de 150 mm. Las diversas modificaciones de la geometría se detallan en la Tabla N° 3.

Tabla N° 3. La modificación de la longitud y la forma de la cabeza de polo del captor PhaseTrack

Cas	Modification de longueur de structure		Modification de la forme de tête de la structure	
	E1 (mm)	E2 (mm)	l 1 (mm)	l 2 (mm)
R	50	100	10	30
1	50	200	10	30
2	50	100	5	5
3	50	200	5	5
4	50	300	5	5

Los resultados de inducción magnética y sensibilidad en (%), a una distancia de separación de placa de 150 mm, se muestran en el siguiente diagrama de la Figura N° 12(a) y (b).

(a)



(b)

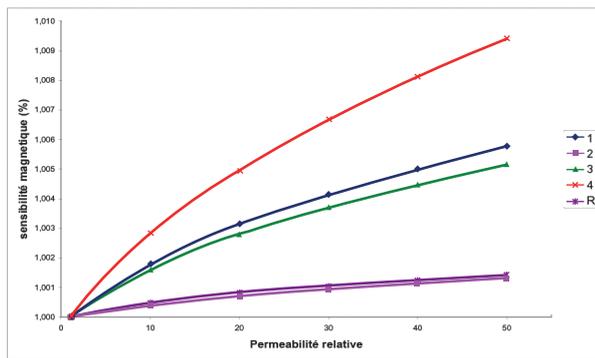


Figura N° 12. La inducción magnética (a) y sensibilidad en % (b), en el polo 2, en función de la permeabilidad relativa del material a una distancia de separación de placa de 150 mm

En la Figura N° 12 se observa que la sensibilidad del caso de referencia R es superior al caso 2, pero este es inferior a los casos 1, 3 y 4.

Una variación de la longitud de la estructura del captor como se muestra en los casos 2, 3 y 4 implica un aumento del valor de la inducción magnética con relación al caso 1. Este último con E1 de 50 mm y E2 de 200 mm no proporciona una mejora de la inducción magnética. La explicación para esta disminución de la inducción magnética es el gran área de cabeza de polo que corresponde a $(10 \times 30) \text{ mm}^2$.

Este mismo caso 1 es más sensible que los casos 2, 3 y el caso de referencia, pero no así como el caso 4, con E1 de 50 mm y un E2 de 300 mm, que es más sensible que el resto de los casos estudiados.

VI. CONCLUSIONES

1. El modelo numérico del captor electromagnético PhaseTrack es una manera eficaz de estimar la permeabilidad del acero, con lo que es posible controlar la calidad metalúrgica del acero a la salida en una operación de laminado en caliente.
2. La fase ferrítica que es altamente magnética conduce direccionalmente las líneas de campo enviando señal hacia los polos negativos 1 y 2, valores a partir de los cuales podemos determinar la permeabilidad de la placa de acero.
3. La primera parte de la validación del modelo numérico a nivel de laboratorio se hizo con éxito porque la diferencia de desviaciones porcentuales entre el experimento y el modelo es de 5%, considerando que la medida de inducción magnética es altamente sensible.

4. La optimización del captor con dimensiones E1 de 50 mm y E2 de 300 mm, y una estructura de forma de cabeza de polo de $(5 \times 5) \text{ mm}^2$ correspondiente al caso 4, es la mejor solución para tener un buen compromiso entre la inducción magnética y la sensibilidad del captor.

VII. AGRADECIMIENTOS

Agradezco a la Universidad Nacional de San Antonio Abad del Cusco por enseñarme las bases científicas muy útiles en esta investigación, a la Universidad de Lorraine de Francia y al Centro de Investigación de ArcelorMittal à Maizieres de Francia, por darme la oportunidad de concretar con esta investigación.

Agradezco también a Roberto Salas, Freddy Escobar, Emma Johansson, Henry Arboleda, Ian Zuazo y a todas las personas que colaboraron en diferentes aspectos en el desarrollo de esta tarea científica.

VIII. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. T. Waeckerlé (2008). Matériaux magnétiques doux cristallins - Magnétisme et métallurgie appliqués; Techniques de l'Ingénieur l'expertise technique et scientifique. Réf. D2121.
2. Papaelas, M.P., Strangwood, M, Peyton, A.J, and. Davis, C.L, (2004). Measurement and Modelling of the Electromagnetic Response to Phase Transformation in Steels. Metallurgical and Materials Transactions A, Vol., 35A, March, p. 965.
3. G. Magnac (2010). Cedrat Technologies S.A. Etude et réalisation d'un dispositif de mesure magnétique - Analyse du principe de fonctionnement ; Ref. Cedrat T,ABE22542009, Grenoble, France.
4. S. Denis (2012). Des concepts a la simulation numérique des procédés exemple de traitement thermique, Institut Jean Lamour, calcul de transformation de phases durant refroidissement, Cours magistral de Métallurgie Numérique, décembre, Nancy, France.
5. S.J. Dickinson, R. Binns, W. Yin, C.L. Davis, A.J. Peyton (2007). The development of a multi-frequency electromagnetic instrument for monitoring the phase transformation of hot strip steel , IEEE Trans Instrument Meas, 56 (3), pp. 879-886.
6. R. Surco (2013). Modélisation par la méthode des éléments finis du capteur électromagnétique pour l'évaluation de la transformation de phases, Rapport de stage, Chapitre V, Université de Nancy & Arcelor-Mittal, Nancy.