



Escola Tècnica Superior d'Enginyeria
de Telecomunicació de Barcelona

UNIVERSITAT POLITÈCNICA DE CATALUNYA

PROJECTE FINAL DE CARRERA

Sistema de mesura inductiu per a la
detecció de fibres d'acer en provetes de
formigó

Estudis: Enginyeria de Telecomunicació

Autor: Francesc Xavier Linares Garcia

Director/a: Josep M. Torrents Dolz

Any: 2014

Índex general

Índex general	1
Índex de figures.....	4
Resum del Projecte	7
Resumen del Proyecto	8
Abstract.....	9
1 Introducció.....	10
1.1 Formigó reforçat amb fibres	10
1.2 Importància dels mètodes no destructius	11
1.3 Alternatives de muntatge	12
1.3.1 Solenoide clàssic	13
1.3.2 Detectors amb nucli de ferrita	13
1.3.3 Detectors de metalls amb software integrat	14
1.4 Objectius.....	15
2 Principi de mesura.....	16
2.1 Camp magnètic i densitat de flux	16
2.2 Llei de Gauss per a camps magnètics	16
2.3 Llei d'Ampère	17
2.4 Camp magnètic en un inductor	17
2.5 Autoinducció	18
2.6 Inducció electromagnètica i corrents de pèrdua o Foucault (Eddy currents).....	18
2.7 Variables principals en els tests basats en els corrents de fuga.	20
2.7.1 Conductivitat elèctrica del material.....	20
2.7.2 Permeabilitat magnètica	20
2.7.3 Enlairament (Lift-Off).....	23

2.7.4	Efecte de vores (Edge-effect)	24
2.7.5	Skin effect.....	24
2.8	Pla complex d'impedància.....	25
2.8.1	Aproximació d'un material no ferromagnètic	26
2.8.2	Aproximació d'un material ferromagnètic	27
2.9	Principi de mesura	28
3	Simulació disseny i muntatge	29
3.1	Base de les bobines.....	29
3.2	Número de voltes i diàmetre del fil	30
3.3	Càlcul de la inductància de les bobines per separat.....	31
3.4	Simulació i càlcul de la inductància de les bobines concèntriques	31
3.5	Estudi del comportament de la bobina gran	34
3.5.1	Comportament de la inductància de la bobina amb la distància	34
3.6	Comportament de la inductància de la bobina concèntrica amb la distància	37
3.7	Freqüència utilitzada.....	41
3.8	Circuit equivalent	43
4	Resultats de les mesures	44
4.1	Detecció de fibres a diferents distàncies de la bobina	44
4.1.1	Detecció del pla de fibres a diferents distàncies de la bobina	45
4.1.2	Detecció del feix de fibres a diferents distàncies de la bobina.....	47
4.1.3	Comparativa dels resultats.....	50
4.2	Mesura de provetes amb diferents concentracions de fibres.....	52
4.2.1	Mesura de la proveta de 20 kg/m ³	53
4.2.2	Mesura de la proveta de 40 kg/m ³	54
4.2.3	Mesura de la proveta de 60 kg/m ³	55
4.2.4	Comparativa i conclusions dels resultats de les tres provetes	56
4.3	Detecció de diferents tipus de fibres	57
4.3.1	Llosa de formigó amb fibres d'acer convencional al carboni.....	58

	3
4.3.2 Llosa de formigó amb fibres d'acer d'alta resistència mecànica	59
4.3.3 Llosa de formigó amb fibres d'acer inoxidable	60
5 Conclusions	62
5.1 Conclusions	62
5.2 Línies futures	63
6 Apèndix.....	64
A. Simulacions del camp magnètic	64
B. Demostració de la oscil·lació de les mesures amb el condensador en paral·lel.	89
C. Mesures inductància bobina gran	92
D. Mesures inductància bobina concèntrica sense condensador en paral·lel respecte a un pla de fibres	96
E. Mesures inductància bobina concèntrica sense condensador en paral·lel respecte a un feix de fibres	105
F. Mesures de les cares de les provetes de diferents concentracions de fibres ...	114
G. Imatges i fotografies del sistema de mesura i les proves realitzades.....	124
H. Taula resum de diferents sistemes proposats.....	131
7 Bibliografia	132

Índex de figures

Il·lustració 1.- Detall d'una fibra d'acer conformada en els extrems	10
Il·lustració 2.- Detall d'un solenoide clàssic amb les línies de camp que aquest genera	13
Il·lustració 3.- Dibuix esquemàtic del nucli de ferrita amb la bobina bobinada a la part superior.....	14
Il·lustració 4.- Imatge del detector LDC1000 EVM.....	15
Il·lustració 5.- Representació des corrents de pèrdua generats per un inductor en un material conductor	19
Il·lustració 6.- Detall de la simulació d'una bobina concèntrica amb un material paramagnètic	21
Il·lustració 7.- Detall de la simulació d'una bobina concèntrica amb un material diamagnètic	22
Il·lustració 8.- Detall de la simulació d'una bobina concèntrica amb un material ferromagnètic	23
Il·lustració 9 Gràfic del punt P0 en el pla d'impedància	26
Il·lustració 10.- Punts representats en el pla normalitzat d'impedàncies d'impedàncies	27
Il·lustració 11.- Detall de la base de PVC de la bobina gran.....	29
Il·lustració 12.- Bobina interior.....	30
Il·lustració 13.- Detall de la simulació axisimètrica de la bobina concèntrica amb el mateix sentit de bobinat per ambdues bobines amb el programa FEMM 4.2	32
Il·lustració 14.- Detall de la inductància resultant de la simulació amb el programa FEMM 4.2	32
Il·lustració 15.- Detall de la simulació axisimètrica de la bobina concèntrica amb el mateix sentit de bobinat per ambdues bobines.....	33
Il·lustració 16.- Detall de la inductància resultant de la simulació amb el programa FEMM 4.2	33
Il·lustració 17.- Pla de fibres utilitzat per al càlcul de la inductància en funció de la distància	35

Il·lustració 18.- Taula i gràfica de la variació d'inductància en funció de la distància a un pla de fibres	35
Il·lustració 19.- Inductància mesurada per a la bobina exterior a diferents freqüències	36
Il·lustració 20.- Gràfica de la variació d'inductància en funció de la distància a un pla de fibres a diferents freqüències	37
Il·lustració 21.- Taula i gràfica de la variació d'inductància de la bobina concèntrica en funció de la distància a un pla de fibres	38
Il·lustració 22.- Inductància de la bobina concèntrica en funció de la freqüència	39
Il·lustració 23.- Gràfica de la variació d'inductància en funció de la distància a un pla de fibres a diferents freqüències	39
Il·lustració 24.- Gràfica comparativa de la variació d'inductància respecte al buit en el cas de 55 kHz entre la bobina exterior i la bobina concèntrica	40
Il·lustració 25.- Especificacions de l'exactitud en la mesura de l'analitzador d'impedàncies HP4192A	42
Il·lustració 26.- Circuit equivalent RLC paral·lel	43
Il·lustració 27.- Taula i gràfica de la variació d'inductància de la bobina concèntrica en funció de la distància a un pla de fibres	46
Il·lustració 28.- Aproximació exponencial del % de variació en el buit respecte la distància	47
Il·lustració 29.- Detall del feix de fibres utilitzat	47
Il·lustració 30.- Taula i gràfica de la variació d'inductància de la bobina concèntrica en funció de la distància a un pla de fibres	49
Il·lustració 31.- Aproximació exponencial del % de variació amb el buit respecte la distància	49
Il·lustració 32.- Taula comparativa dels resultats de les dues proves	50
Il·lustració 33.- Gràfica comparativa del percentatge de variació respecte el buit entre el pla i el feix de fibres	51
Il·lustració 34.- Disposició de les cares de la proveta de formigó	52
Il·lustració 35.- Gràfica del percentatge de variació respecte el buit de cada una de les cares de la proveta de 20 kg/m ³	53

Il·lustració 36.- Gràfica del percentatge de variació respecte el buit de cada una de les cares de la proveta de 40 kg/m ³	54
Il·lustració 37.- Gràfica del percentatge de variació respecte el buit de cada una de les cares de la proveta de 60 kg/m ³	55
Il·lustració 38.- Gràfica final comparativa del percentatge de variació de la inductància de la bobina respecte a una concentració determinada de fibres en el formigó	56
Il·lustració 39.- Aproximació lineal de la densitat de fibres respecte a un percentatge de variació d'inductància determinat	57
Il·lustració 40.- Divisió de les zones de mesura sobre la llosa de formigó	57
Il·lustració 41.- Taula de resultats de les mesures d'inductància en la llosa que conté fibra d'acer convencional al carboni	58
Il·lustració 42.- Representació de les mesures d'inductància en la llosa de formigó	59
Il·lustració 43.- Taula de resultats de les mesures d'inductància en la llosa que conté fibra d'acer d'alta resistència mecànica.....	60
Il·lustració 44.- Representació de les mesures d'inductància en la llosa de formigó	60
Il·lustració 45.- Taula de resultats de les mesures d'inductància en la llosa que conté fibra d'acer d'alta resistència mecànica.....	61
Il·lustració 46.- Representació de les mesures d'inductància en la llosa de formigó	61
Il·lustració 47.- Nuclis de ferrita.....	63

Resum del Projecte

Des de finals del segle XX s'han introduït en l'àmbit de la construcció, estructures de formigó reforçades amb fibres d'acer. Aquest tipus d'estructures necessiten un tipus de validació de la quantitat i l'orientació de les fibres que contenen per tal d'assegurar-ne factors importants com l'esforç a la tracció de l'estructura.

Actualment, per a realitzar aquest tipus de validació s'utilitzen tècniques destructives on es parteix la mostra a analitzar per tal de realitzar el test i se n'extrapolen els resultats a la resta de la producció. Aquest fet provoca que les estructures que utilitzen les fibres d'acer no puguin utilitzar-se en la construcció d'elements destinats a la utilització humana.

En aquest estudi, per tal d'evitar l'ús d'aquestes proves i fer viable l'ús d'aquestes estructures en l'àmbit d'activitats humanes, es dissenyarà i es provarà un sistema de mesura inductiu que sigui capaç de realitzar tests de validació no destructius. D'aquesta manera es podrà determinar la presència i l'orientació de les fibres dins de les provetes de test i les mateixes que s'usen per a la construcció dels elements.

Resumen del Proyecto

Desde finales del siglo XX se han introducido en el ámbito de la construcción, estructuras de hormigón reforzadas con fibras de acero. Este tipo de estructuras precisan de una validación de la cantidad y la orientación de las fibras que contienen para así asegurar factores importantes como el esfuerzo a la tracción de la estructura.

Actualmente, para realizar dicha validación se usan técnicas destructivas en las cuales se pierde la integridad de la muestra a analizar para realizar el test y se extrapolan los resultados al resto de la producción. Este hecho provoca que las estructuras que emplean las fibras de acero no sea apto para la construcción de elementos destinados al uso del ser humano.

En este estudio, con el fin de evitar el uso de dichas pruebas y hacer viable el uso de estas estructuras en el ámbito de actividades humanas, se diseñará y se probará un sistema de medida inductivo que sea capaz de realizar las pruebas de validación no destructivas. De este modo, se podrá determinar la presencia y la orientación de las fibras tanto en el interior de las probetas de test como en las probetas empleadas en la construcción de todo tipo de elementos.

Abstract

From the ending of the twentieth century, concrete structures reinforced with steel fibers have been introduced in the field of construction. Such structures require a validation of the number of fibers and its orientation, in order to control important factors such as stress of the structure.

Nowadays, destructive techniques are used in order to validate those structures. In these tests, a test sample is destroyed to be analyzed and using polarization, the results are applied to the rest of the production. As a consequence, all these structures have been declared unfit for the human use.

In this study, an inductive system is designed in order to avoid the use of destructive tests to make feasible the use of such structures in human life. All the system is thought to work as a non-destructive test. Furthermore, it will determine the steel fibers presence and orientation inside both the test specimens and the specimens used in the construction of all kinds of elements.

1 Introducció

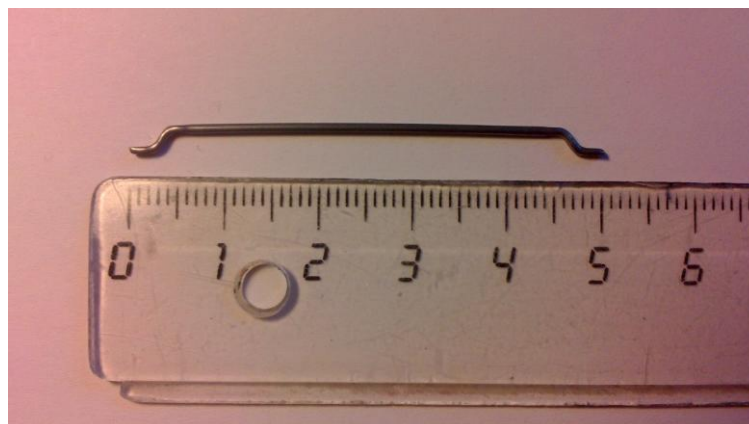
1.1 Formigó reforçat amb fibres

En l'actualitat, el formigó reforçat amb fibres és un compost cada vegada més utilitzat en l'àmbit de la construcció, especialment en obra civil, gràcies a les propietats que aquest aporta en el seu àmbit.

La proporció adequada de fibres és la que aporta al formigó un major o menor esforç, que es tradueix en una millora en les seves característiques de tenacitat, fissuració i resistència a la flexotracció. La proporció adequada de fibres ha de procurar una bona adherència entre el formigó i les fibres per així poder aconseguir una distribució uniforme que converteixi el formigó en un material dúctil que redueixi la seva tendència a la fissura.

Les fibres utilitzades en la construcció són d'acer, que és un component que té un mòdul d'elasticitat deu vegades més gran que el del formigó, tenen una adherència bastant bona, la seva deformació en trencament és elevada i són fàcils de barrejar en el formigó.

Per tal de millorar l'adherència d'aquesta amb el formigó, la fibra té una forma recta amb els extrems conformats. Existeixen diferents models de fibres, un dels més clàssics és el que consta d'una fibra que té una llargada de 5 cm i fa 1 mm de diàmetre, tal i com es pot observar en la il·lustració 1.



Il·lustració 1.- Detall d'una fibra d'acer conformada en els extrems

La introducció de les fibres en el formigó aporta les característiques següents:

- Les fibres fan un cosit en les fissures del formigó formant un pont entre els àrids, permetent un cert control en les fissures i evitant una fractura fràgil.
- Augmenta la resistència a la corrosió ja que es controla l'obertura de les fissures i per tant l'entrada d'aigua es redueix.
- Millora la resistència a tracció, flexió i tall.
- Alta resiliència, és a dir, s'aconsegueix una alta resistència als impactes.
- Dóna un reforç uniforme en les tres direccions.
- En paviments projectats amb formigó reforçat amb fibres, els espessors poden disminuir conservant les mateixes propietats.

La proporció de fibres que s'utilitza habitualment es troba entre el 0.35% i el 2% en volum, que correspon a un pes de fibres entre 30 kg/m³ i 170 kg/m³.

1.2 Importància dels mètodes no destructius

La problemàtica principal en les estructures de formigó reforçades amb fibres d'acer es troba en el moment d'examinar si l'estructura pot continuar oferint les propietats per les quals s'ha dissenyat. Aquest problema s'accentua en situacions en les que s'ha de fer un test que no destrueixi o afecti les propietats del formigó.

Com a solució a aquesta problemàtica, apareixen els mètodes no destructius, els quals permeten provar l'estructura sense afectar la seva integritat. Aquests mètodes poden aplicar-se tant en estructures noves com en estructures antigues. La diferència entre les dues aplicacions és que normalment quan s'apliquin sobre estructures noves, la finalitat serà per controlar la qualitat. Per altra banda, quan s'apliquin sobre estructures velles, aquest mètode es centrarà en determinar si aquell formigó segueix mantenint unes certes propietats o condicions mínimes.

Dins del camp que ens pertoca, el del formigó reforçat, hi ha certs casos en que és necessari que el mètode d'inspecció sigui un mètode no destructiu. Alguns d'ells són:

- Controlar la qualitat in situ en construccions.
- Determinar l'existència de trencament i defectes en estructures de formigó reforçat.
- Determinar la uniformitat de fibres en formigó reforçat.
- Determinar la posició i quantitat de fibres en el formigó.
- Disminuir el nombre d'assajos destructius.
- Determinar si han canviat les propietats del formigó reforçat.

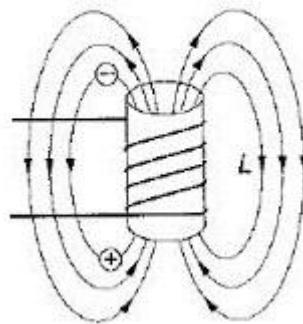
L'aplicació més important i més utilitzada és la de poder mesurar in situ. Això significa que es pot mesurar directament sobre les estructures, sense necessitat de trasllat, és a dir, un equivalent vàlid a la simple inspecció de la col·locació de l'armadura convencional. Aquesta aplicació es sol realitzar sobre estructures velles en les quals es vol realitzar un control per comprovar que l'estructura no presenti defectes en el formigó.

1.3 Alternatives de muntatge

En els últims temps s'han implantat diferents mètodes de detecció de les fibres d'acer els quals han anat evolucionant fins avui. Uns utilitzen la mateixa bobina com a emissora i receptora, identificant la variació d'algun dels seus paràmetres com pot ser la inductància, impedància, freqüència de ressonància... Una altra estructura és la formada per dues bobines, en la qual una farà les funcions d'emissora i l'altra de receptora. Entre una gran varietat, destaquen els tres models bàsics sobre els que s'han fet moltes evolucions: el solenoide clàssic, detectors basats en ferrita i finalment els típics detectors de metalls amb un software de processament de senyal incorporat. A continuació es descriuen en grans trets les principals característiques i el principi de funcionament de cada un d'ells.

1.3.1 Solenoide clàssic

El solenoide clàssic és el primer i més bàsic de tots els detectors inductius. Consisteix en una bobina connectada a una font de corrent la qual circula a través de la bobina, creant un camp magnètic tal i com es pot veure a la següent il·lustració:



Il·lustració 2.- Detall d'un solenoide clàssic amb les línies de camp que aquest genera

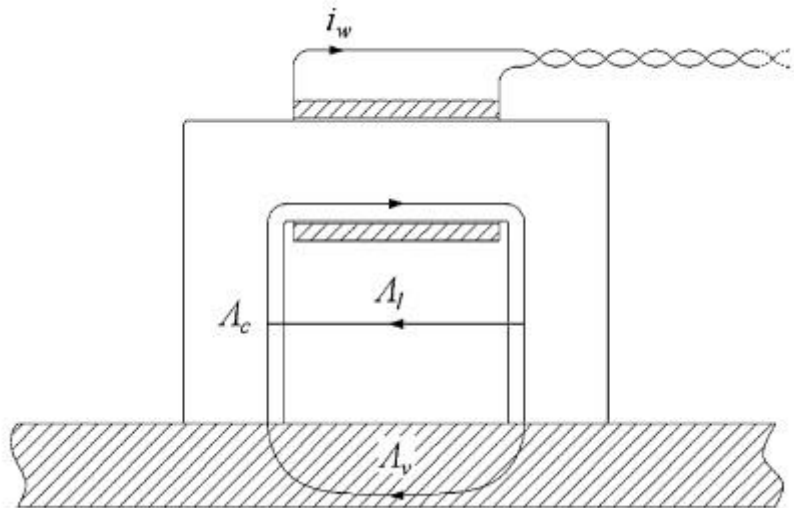
Aquest solenoide detectarà les fibres d'acer en el resultat d'un augment en la inductància total de la bobina. Aquest detector no és capaç de fer una valoració de l'orientació de les fibres, i el seu abast és bastant limitat si no s'utilitza amb més components (per exemple, ferrita en el seu nucli per augmentar la seva sensibilitat).

1.3.2 Detectors amb nucli de ferrita

És un mètode de detecció de la densitat de fibres i la seva orientació gràcies a un nucli de ferrita i una bobina bobinada entorn aquest nucli. Es basa en la variació de la impedància del conjunt bobina i ferrita que ve provocada per la presència i la posició relativa de les fibres que modifiquen el flux vinculat amb el bobinat de la bobina.

Aquest sistema detecta el màxim de la inductància mesurada quan els eixos magnètics de la bobina i la direcció mitjana de les fibres estan alineats. D'aquesta manera, rotant la proveta pels eixos de simetria es pot trobar la posició angular on es detecta el màxim d'inductància i d'aquesta manera es determina la direcció mitjana de les fibres.

Hi ha diferents varietats de nuclis de ferrites: en forma d'U, en forma d'E... però el més comú i regulat és el nucli en forma d'U, utilitzat molts estudis (Ferrara, Faifer i Toscani, 2012, p.575-589).



Il·lustració 3.- Dibuix esquemàtic del nucli de ferrita amb la bobina bobinada a la part superior. i_w és el corrent procedent de la font i Λ_c , Λ_l i Λ_v són les permeabilitats del nucli de ferrita, de l'aire i de la superfície a mesurar respectivament

1.3.3 Detectors de metalls amb software integrat

Al mercat es poden trobar detectors d'objectes metàl·lics els quals venen amb un microcontrolador i un sistema de processat del senyal que permet veure les dades representades en un ordinador. Un exemple d'aquests detectors és el LDC 1000 EVM de l'empresa Texas Instruments el qual consta de tres parts: La bobina detectora plana, el microcontrolador i l'interfaç USB.



Il·lustració 4.- Imatge del detector LDC1000 EVM

La part de la bobina plana es modela com una bobina, un condensador i una resistència variable tot en paral·lel. La distància al metall a mesurar la detecta a partir de la variació de la resistència en paral·lel la qual està acotada amb una $R_{\min}$ i una $R_{\max}$ que prèviament s'han configurat.

Aquest detector permet detectar amb poca sensibilitat els metalls propers a la bobina i el gran avantatge que té és el software que proporciona el microcontrolador i l'interfaç USB.

1.4 Objectius

Aquest projecte es centrarà en el disseny, la simulació, el muntatge, la caracterització i les mesures pertinents d'una bobina concèntrica que permeti detectar les fibres d'acer que contenen les provetes de formigó efectuant mesures superficials. Per a detectar aquestes fibres es mesurarà la variació d'inductància de la bobina, ja que aquest paràmetre és fàcil de mesurar gràcies a l'analitzador d'impedàncies disponible en el laboratori.

El disseny de la bobina ha de permetre, a més, aconseguir detectar les fibres de formigó a una distància el més gran possible de la proveta.

2 Principi de mesura

2.1 Camp magnètic i densitat de flux

El camp magnètic B varia inversament amb el quadrat de la distància de l'element de corrent que el produeix. A causa d'això, el camp magnètic B també es pot denominar inducció magnètica o densitat de flux magnètic. En el sistema internacional d'unitats (SI) el camp magnètic (B) ve donat en Tesles; $1 \text{ Tesla (T)} = 1 \text{ weber/metre}^2 \text{ (Wb/m}^2\text{)}$. Al ser el tesla una unitat relativament gran, el camp magnètic s'expressa en Gauss (G): $1\text{T}=10^4 \text{ G}$.

El camp magnètic B s'ha de distingir de la intensitat de camp magnètic H , on tenim que $B = \mu H$, essent μ la permeabilitat magnètica. Les unitats de la intensitat de camp magnètic H són Ampers-volta.

El flux magnètic ϕ a través d'una superfície A normal a les línies de camp magnètic B es defineix com $d\phi=B.dA$, i el flux magnètic total a través d'una àrea finita com $\phi=\iint B.dA$. En el sistema SI la unitat del flux magnètic és el Weber (Wb).

2.2 Llei de Gauss per a camps magnètics

Pel flux magnètic tenim l'expressió $\iint B.dA = Q_M$ on Q_M seria la càrrega total magnètica dins d'una superfície tancada. Al no existir aquesta càrrega en el cas dels camps magnètics, l'expressió anterior resulta $\iint B.dA = 0$. Aquesta expressió ens diu doncs, que les línies de camp no poden acabar sobre un objecte, sinó que han d'acabar sobre elles mateixes, o el que és el mateix: les línies de camp magnètic formen línies tancades.

2.3 Llei d'Ampère

El camp magnètic creat per un corrent circulant I en un fil infinitament llarg és $B = \frac{\mu_0 I}{2\pi R}$ essent $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m la permeabilitat del buit i R el radi de la circumferència del camp magnètic creat.

La integració de B al voltant d'un camí circular de radi R que envolta el fil resulta

$$\oint B \cdot dl = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} \oint dl = \frac{\mu_0 I}{2\pi R} 2\pi R = \mu_0 I.$$

Finalment doncs, és fàcil observar que la llei d'Ampère permet relacionar els camps magnètics amb els corrents elèctrics mitjançant l'expressió trobada: $\oint B \cdot dl = \mu_0 I$.

2.4 Camp magnètic en un inductor

L'objectiu d'aquest apartat és determinar el camp magnètic B que produeix un inductor partint des de dues equacions diferents. La primera equació es basa en la llei d'Ampère aplicada sobre l'inductor i la segona es calcula a partir de l'equació del camp magnètic creat per una espira.

Per un inductor idealment infinit, el camp magnètic creat en qualsevol punt del seu interior ha de ser paral·lel al seu eix, mentre que el camp magnètic en l'exterior serà pràcticament nul.

Si s'aplica doncs la llei d'Ampère a l'inductor resulta $\oint B \cdot dl = \mu_0 NI$, essent N el número de voltes de l'inductor. Si es resol l'equació anterior, s'obté que el camp magnètic $B = \frac{\mu_0 NI}{l} = \mu_0 nI$ on n és el número de voltes per unitat de longitud $n = \frac{N}{l}$ i l la longitud axial de l'inductor.

Si es parteix ara des de l'equació de camp magnètic creat per una espira, utilitzem l'expressió $B_z = \frac{\mu_0 a^2}{2(a^2 + z^2)^{3/2}} I$, on a és el radi de l'espira i z és la distància des del centre de l'espira al punt on es mesura el camp magnètic. Considerant un inductor de longitud l com una sèrie de N espires i tenint en compte que tant en el cas de l'espira com de l'inductor només existeix una component de camp en la direcció z (paral·lela a l'eix de l'inductor);

obtenim que el camp total B en el punt central de l'inductor és $B_z = \frac{\mu_0 N I a^2}{2l} \int_{-l/2}^{l/2} \frac{dz}{(a^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 N I}{(4a^2 + l^2)^{1/2}}$.

Finalment, si es calcula el camp magnètic B en els extrems de la bobina, els límits d'integració són de 0 a l, i el camp magnètic resulta $B_z = \frac{\mu_0 N I a^2}{2l} \int_0^l \frac{dz}{(a^2 + z^2)^{3/2}} = \frac{\mu_0 N I}{2(a^2 + l^2)^{1/2}}$.

2.5 Autoinducció

El coeficient d'autoinducció és un paràmetre que defineix el flux magnètic que comprèn el dispositiu quan per aquest hi circula un corrent elèctric. És també una mesura de la quantitat d'energia emmagatzemada en el camp magnètic d'un inductor.

Tal i com diu la definició del coeficient d'autoinducció, aquest és la relació del flux que circula per l'interior de l'inductor i que engloba totes les voltes $\Lambda = N\phi = N \iint B \cdot dA$; entre el corrent elèctric que hi circula I: $L = \frac{\Lambda}{I} = \frac{N \iint B \cdot dA}{I} = \frac{NBA}{I} [H]$.

Com es pot observar, no es tenen en compte els petits fluxos que envolten cada volta de l'inductor per separat.

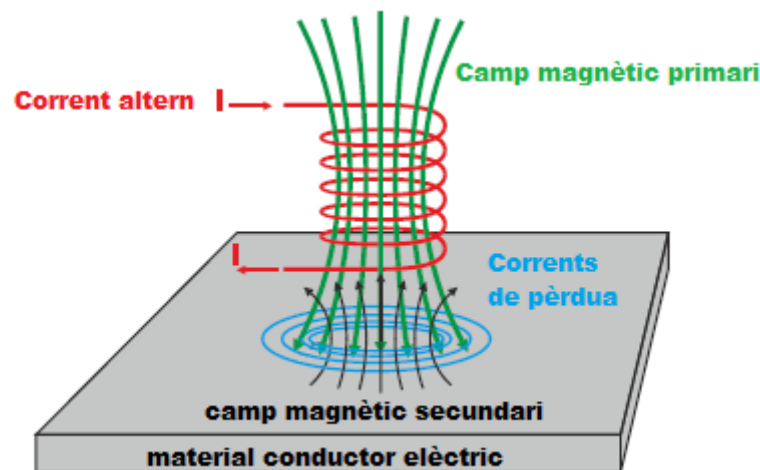
2.6 Inducció electromagnètica i corrents de pèrdua o Foucault (Eddy currents)

Cada bobina es caracteritza per un paràmetre d'impedància Z_0 el qual és un nombre complex definit com $Z_0 = \frac{V_0}{I_0} = R_0 + jX_0 = R_0 + j2\pi f L_0$.

Aquest paràmetre representa la relació tensió-corrent per a una determinada freqüència sinusoïdal d'excitació. Aquesta impedància té una magnitud $|Z_0| = \sqrt{R_0^2 + X_0^2}$ i una fase $\varphi = \arctg \frac{X_0}{R_0}$.

Quan un corrent altern alimenta la bobina, es crea un camp magnètic variable en el temps. Les línies magnètiques de flux creades per aquest corrent tendeixen a concentrar-se al centre de la bobina. L'any 1831, Faraday va demostrar experimentalment que quan s'introdueix un objecte en una regió sota l'acció d'un camp magnètic variable en el temps, s'indueixen en ell uns corrents anomenats de circulació o pèrdua (eddy currents). Si s'indueix un corrent, es pot dir que en el circuit s'ha generat una força electromotriu induïda. La fem induïda $\mathcal{E}_{\text{ind}}$ en un circuit és igual a la derivada respecte al temps, canviada de signe, del flux magnètic a través del circuit $\mathcal{E}_{\text{ind}} = -\frac{d\Phi_B}{dt}$.

Quan una bobina alimentada amb corrent altern s'apropa a un conductor elèctric de material no ferromagnètic, el camp magnètic primari variable en el temps penetra el material i genera corrents de pèrdua continus i circulars. Els corrents induïts que circulen pel material de prova generen un camp magnètic secundari que segons la llei de Lenz s'oposa al camp magnètic primari tal i com es pot veure en la il·lustració 5.



Il·lustració 5.- Representació des corrents de pèrdua generats per un inductor en un material conductor

Aquest camp magnètic oposat, que prové del material conductor, té un efecte dissipador en el camp magnètic primari. Com a conseqüència, la nova part imaginària de la impedància de la bobina creix quan els corrents de pèrdua del material a testar incrementen. Els corrents de pèrdua també contribueixen a l'increment de la potència de dissipació d'energia que fa variar la part real de la impedància de la bobina. Si es mesura aquesta variació d'impedància de la bobina des de Z_0 fins a Z_c , monitoritzant la tensió o el corrent, es pot arribar a determinar informació específica com la conductivitat i d'aquí, la composició

química del material provat.

2.7 Variables principals en els tests basats en els corrents de fuga.

2.7.1 Conductivitat elèctrica del material

Els materials tenen una resistència característica cap a la circulació d'electricitat que es caracteritza amb la magnitud de la seva conductivitat elèctrica σ o la seva resistivitat $\rho = \frac{1}{\sigma}$.

La conductivitat elèctrica té una relació molt important amb els corrents de fuga, ja que els materials amb alta conductivitat elèctrica creen intensos corrents de fuga. Els materials de baixa conductivitat en canvi, creen corrents de fuga menors però tenen una major profunditat de penetració en una freqüència fixada.

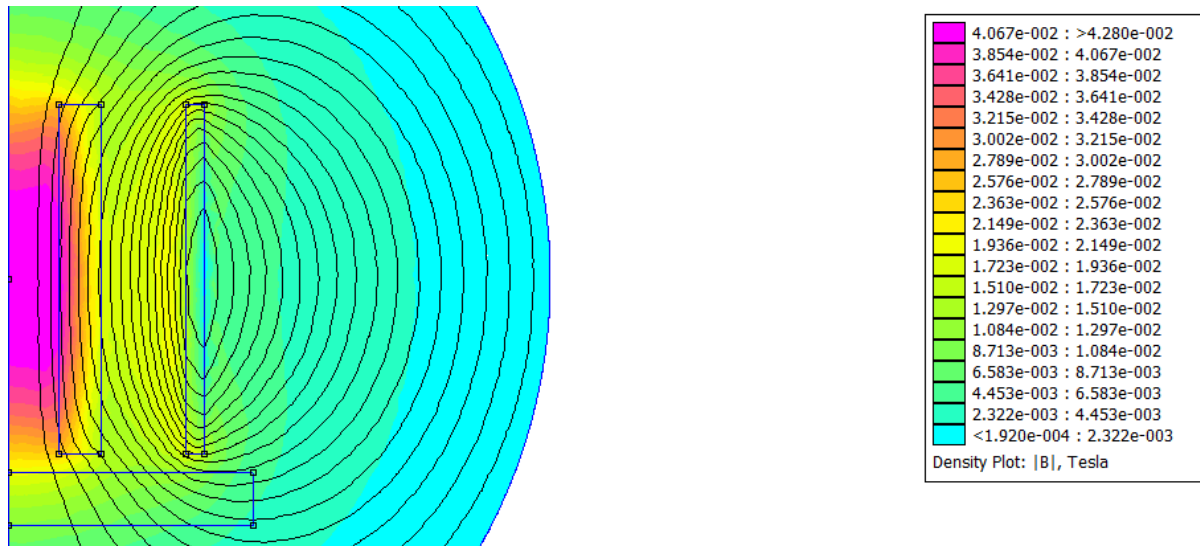
Entre els diversos factors que influeixen en el valor de la conductivitat elèctrica se'n destaquen tres: la temperatura de la proveta, la composició de l'aliatge i la tensió residual, que està relacionada amb l'estructura atòmica del material.

2.7.2 Permeabilitat magnètica

La permeabilitat magnètica μ és un nombre que quantifica el grau d'inducció magnètica B dels materials quan s'aplica un camp magnètic H : $B = \mu H$. En els medis isotròpics la permeabilitat magnètica és escalar i l'espai lliure té com a característica que μ és constant i pren el valor de $\mu = \mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m. En molts casos, la permeabilitat dels materials és expressada com μ_r , de tal manera que la permeabilitat total és $\mu = \mu_r \cdot \mu_0$.

Els materials es poden classificar per les seves propietats magnètiques, les quals afecten considerablement les proves basades en els corrents de fuga. Aquests materials són:

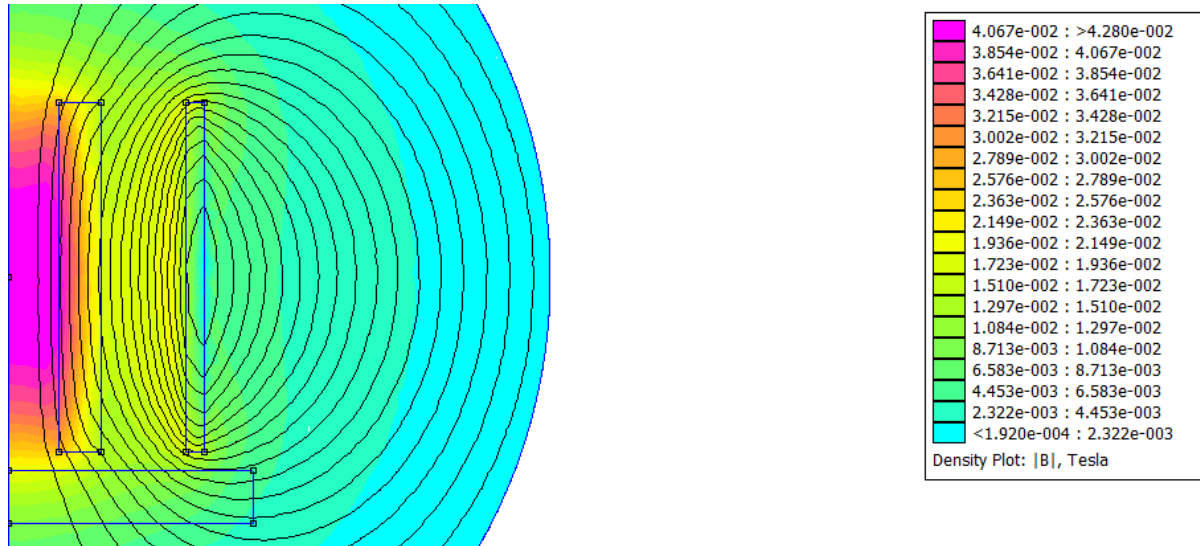
Materials paramagnètics: Són materials metàl·lics poc atrets pels camps magnètics. Tenen una $\mu_r \geq 1$. Un material d'aquest tipus és l'alumini.



Il·lustració 6.- Detall de la simulació d'una bobina concèntrica amb un material paramagnètic¹

¹ Simulació feta amb el programa FEMM 4.2 en el qual s'ha simulat una bobina concèntrica (dos rectangles verticals) amb la interacció d'un material paramagnètic: alumini (el rectangle horitzontal). Els colors pertanyen al flux de camp magnètic i les línies de camp són les línies de camp magnètic.

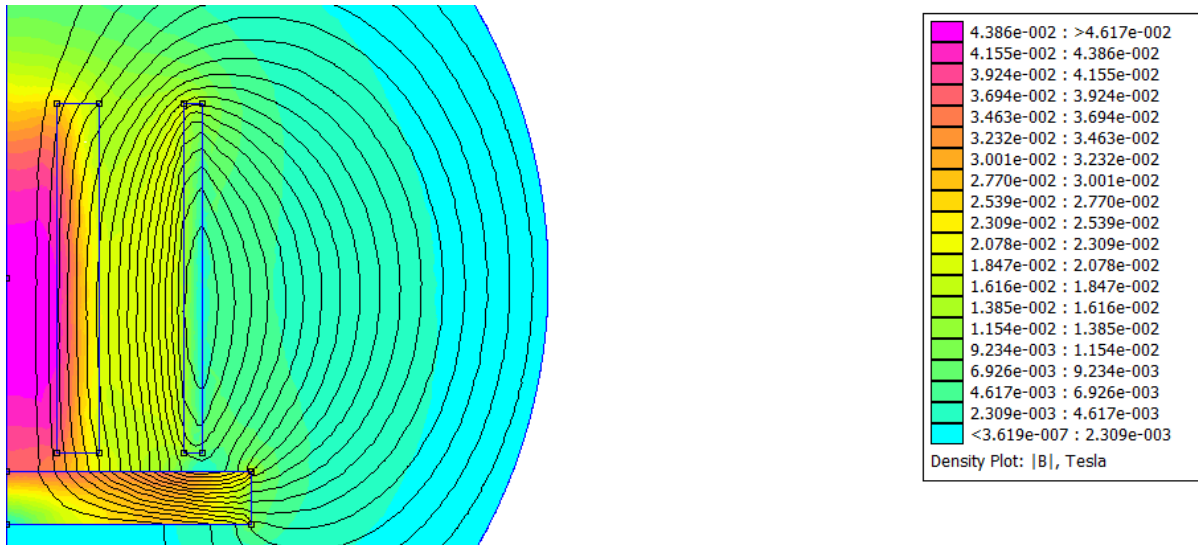
Materials diamagnètics: Són materials els quals creen un camp magnètic oposat al camp principal, a mode de rebuig. Tenen una $\mu_r \leq 1$. Materials d'aquest tipus són el coure i el plom.



Il·lustració 7.- Detall de la simulació d'una bobina concèntrica amb un material diamagnètic²

Materials ferromagnètics: Són materials fortament atrets pels camps magnètics i tenen com a particularitat que concentren el flux dels camps magnètics. Tenen una $\mu_r \gg 1$, normalment entre 100 i 200. Materials d'aquest tipus són el ferro, el níquel, el cobalt i alguns dels seus aliatges.

² Simulació feta amb el programa FEMM 4.2 en el qual s'ha simulat una bobina concèntrica (dos rectangles verticals) amb la interacció d'un material diamagnètic: coure (el rectangle horitzontal). Els colors pertanyen al flux de camp magnètic i les línies de camp són les línies de camp magnètic.



Il·lustració 8.- Detall de la simulació d'una bobina concèntrica amb un material ferromagnètic³

Cal destacar que les simulacions dels materials paramagnètics i diamagnètics ens han sortit molt similars. Això és degut a que tant en el primer com en el segon cas, la μ_r és molt pròxima a 1 i les diferències en les simulacions tan sols són observables en els valors del flux del camp magnètic, essent el material diamagnètic el que conté un flux de camp magnètic superior al voltant del material.

2.7.3 Enlairament (Lift-Off)

És el canvi d'impedància que es produeix quan hi ha una variació de la distància entre la bobina que mesura i l'objecte a mesurar. Les variacions de lift-off poden ser producte de variar les capes de gruix, de superfícies de proves irregulars o moviments de l'operari.

Com el camp magnètic, que és més gran com més a prop s'està de la bobina, aquest efecte és més gran com més a prop està de la superfície de prova.

³ Simulació feta amb el programa FEMM 4.2 en el qual s'ha simulat una bobina concèntrica (dos rectangles verticals) amb la interacció d'un material ferromagnètic: acer pur (el rectangle horitzontal). Els colors pertanyen al flux de camp magnètic i les línies de camp són les línies de camp magnètic.

2.7.4 Efecte de vores (Edge-effect)

Succeeix quan la bobina es troba en un dels vèrtexs o arestes de la proveta si aquesta en conté. Quan això passa, els corrents de fuga es distorsionen ja que no poden fluïr per la vora. Alguns estudis [García-Martín, Gómez-Gil i Vázquez-Sánchez, 2011, p. 2525-2565] apunten que l'efecte de vores és present a una distància d'1 a 3 vegades el diàmetre de la bobina en el cas de les proves en que la bobina encercla la proveta.

2.7.5 Skin effect

El gruix del material a analitzar ha de ser aproximadament 2 o 3 vegades la profunditat de penetració màxima per prevenir l'aparició de corrents de fuga en l'altre costat del material de prova. La profunditat de penetració màxima ve definida per la següent fórmula:

$$\delta(m) = \sqrt{\frac{2}{\mu\omega\sigma}}$$

On $\delta(m)$ és la profunditat de penetració expressada en metres, μ és la permeabilitat magnètica total del material, $\omega = 2\pi f$ és la pulsació d'excitació i σ és la conductivitat elèctrica del material.

2.8 Pla complex d'impedància

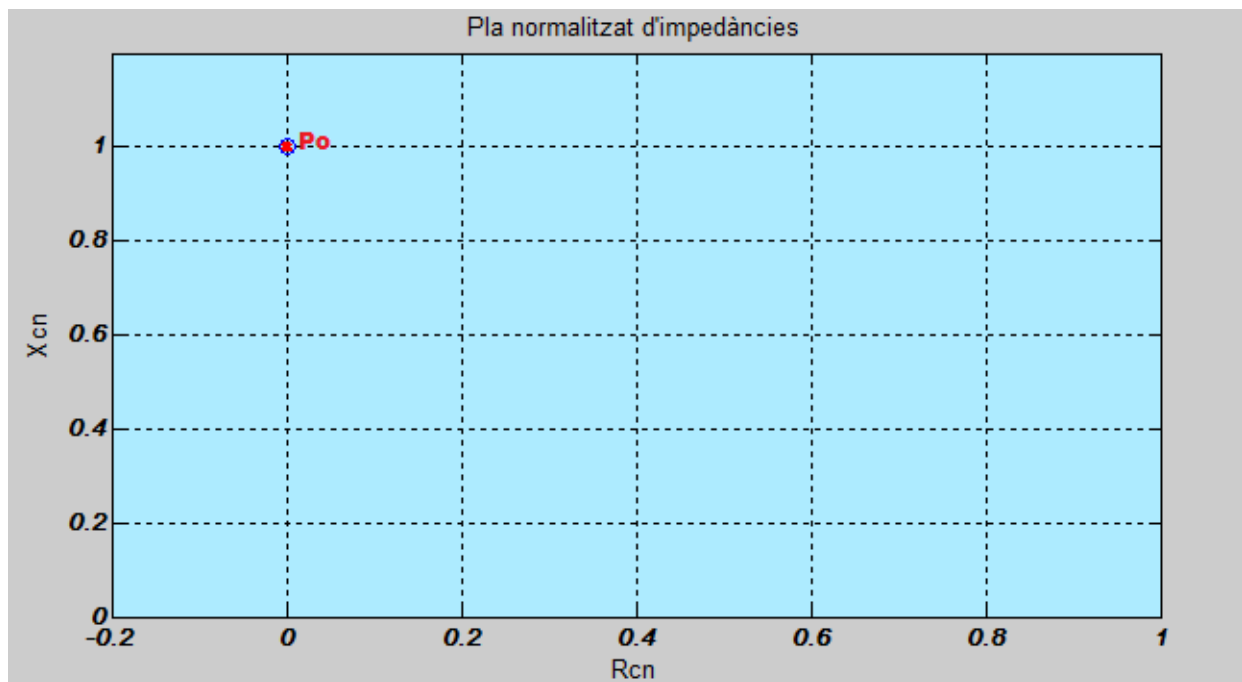
L'objectiu d'aquest apartat és descriure els canvis que pateix la impedància de la bobina quan aquesta interactua amb diferents tipus de materials i com es representen aquests dins del pla normalitzat d'impedància.

Tal i com s'ha descrit en l'apartat anterior, la impedància de la bobina quan no hi ha cap altre material interactuant es pot definir com $Z_0 = R_0 + jX_0$ amb $X_0 = 2\pi f L_0$. Tal i com es pot observar, R_0 és la part real de la impedància i X_0 és la part imaginària de la mateixa, la qual és proporcional a la freqüència f i al coeficient d'inducció L_0 .

Quan un material conductor s'aproxima a la bobina, d'acord amb l'apartat anterior, els corrents de fuga apareixen en el material tot creant un camp magnètic secundari que interactua amb el camp magnètic primari. A resultes d'aquest fet, la nova impedància de la bobina es pot definir com $Z_c = R_c + jX_c$ amb $X_c = 2\pi f L_c$.

Com es pot veure, la impedància de la bobina és una variable bidimensional, i la part real i la part imaginària es poden representar en un pla d'impedàncies. Aquest pla contindrà la part real de la impedància en l'eix d'abscisses (eix X) i la part imaginària en l'eix d'ordenades (eix Y). Si es vol obtenir el pla normalitzat d'impedàncies, es poden definir la part real i la part imaginària com R_{cn} i X_{cn} respectivament. Així doncs, es defineix la transformada per al pla com $R_{cn} = \frac{R_c - R_0}{X_0}$ i $X_{cn} = \frac{X_c}{X_0}$.

La part real normalitzada de la nova impedància R_{cn} és 0 quan no hi ha canvis en la part real de la impedància. R_{cn} es divideix per la part imaginària de la impedància, X_0 quan no hi ha cap metall a prop del sensor. X_{cn} representa el nombre de vegades que la nova part imaginària de Z_c és major o menor que la part imaginària sense cap material, X_0 . Com a aclariment, aquesta transformació significa que, quan no hi ha cap material a prop de la bobina, la nova impedància transformada té com a valors $R_{cn} = 0$ i $X_{cn} = 1$. Aquest punt s'anomena P_0 .



II·lustració 9 Gràfic del punt P_0 en el pla d'impedància

A continuació es descriu el comportament d'aquesta nova impedància normalitzada en dos casos ben oposats: l'aproximació d'un material ferromagnètic i un de no ferromagnètic a la bobina.

2.8.1 Aproximació d'un material no ferromagnètic

Suposem un material no ferromagnètic de conductivitat σ_1 . A l'acostar aquest material a la bobina, d'acord amb la teoria, apareixen uns corrents de fuga circulars en el material que creen el camp magnètic secundari. Efectivament, en el pla, la nostra impedància, adquireix un altre valor, el qual es representa mitjançant el punt P_1 . Dins del pla normalitzat d'impedàncies, el desplaçament del punt P_0 al punt P_1 és el que s'anomena línia d'enlairament (*lift-off line*) per aquest material amb conductivitat σ_1 .

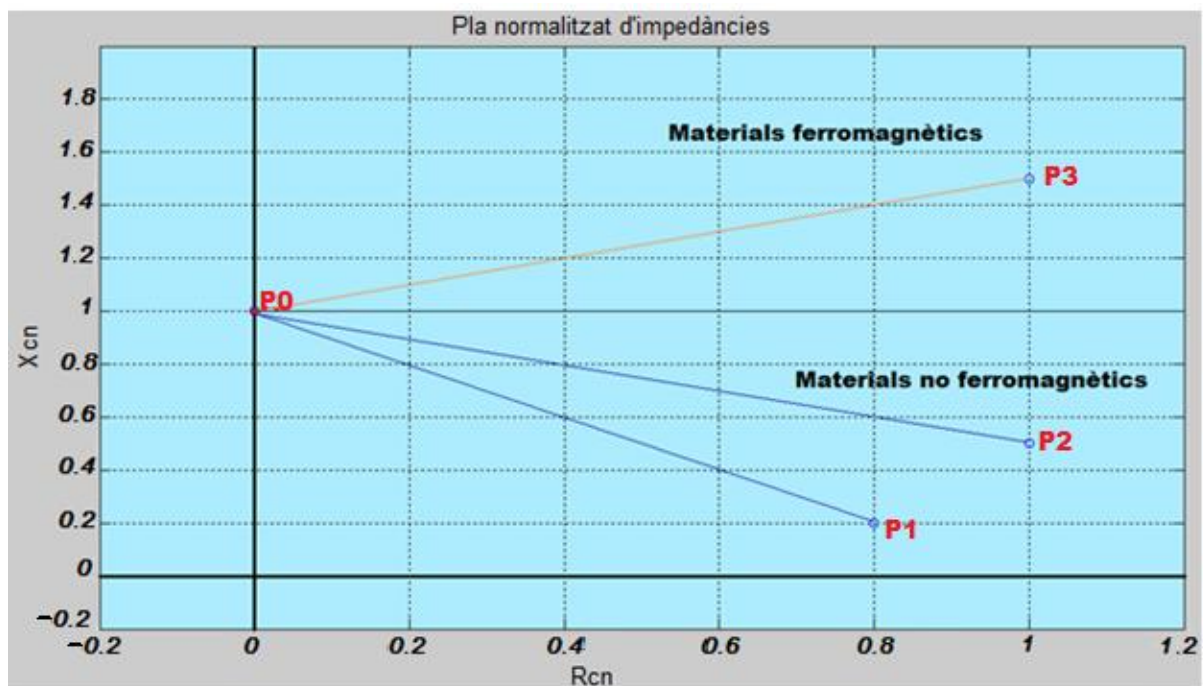
En aquest punt P_1 es compleix que $R_{cn1} > 0$ ja que els corrents de fuga creen potència de dissipació en el material conductor. També es compleix que $X_{cn1} < 1$ ja que $X_c < X_0$ degut a l'efecte de dissipació del camp total dins de la bobina com a conseqüència del camp secundari creat pels corrents de fuga.

Si es considera ara un material no ferromagnètic de conductivitat σ_2 tal que $\sigma_2 < \sigma_1$ tenim un

nou punt P_2 en el pla d'impedàncies. En aquest nou punt es compleix que $0 < R_{cn2} < R_{cn1}$ ja que els corrents de fuga disminueixen degut a la conductivitat. També té com a particularitat que $X_{cn1} < X_{cn2} < 1$ ja que el camp magnètic secundari no és tant fort.

2.8.2 Aproximació d'un material ferromagnètic

Els materials ferromagnètics, en els quals la permeabilitat magnètica és més gran que en els materials no ferromagnètics, concentren el camp magnètic primari de la bobina. Al concentrar aquest camp, es produeix un increment del camp primari en el material, el qual eclipsa el camp secundari creat pels corrents de fuga induïts. Per aquest motiu, en els materials ferromagnètics, a diferència dels altres, $X_{cn} > 1$. En el dibuix que es mostra a continuació, aquest punt es representa pel punt P3.



Il·lustració 10.- Punts representats en el pla normalitzat d'impedàncies d'impedàncies

2.9 Principi de mesura

Els mètodes basats en inducció magnètica permeten determinar les característiques de materials que tenen una certa conductivitat. En el nostre cas s'intenta diferenciar i classificar provetes segons la concentració de fibres que tenen en el seu interior. El procediment a seguir és el següent: Es connecta una font de corrent altern al circuit. Aquesta crea un camp magnètic variable en el temps que es representa per la seva inducció magnètica B , les línies magnètiques del qual travessaran perpendicularment la direcció de l'espira que forma el circuit. Com s'ha explicat abans, aquest fet crearà una força electromotriu ε , l'efecte de la qual serà la de contrarrestar la variació de corrent original que s'estableix en el circuit, i per tant, serà proporcional, en valor negatiu, a la variació d'aquest corrent $\varepsilon = -L \frac{dI}{dt}$.

L es una constant del circuit que depèn de la seva geometria, denominada inductància i es mesura en Henris (H). D'acord amb la llei de Faraday, la fem autoinduída en un inductor de N espises i flux magnètic val $\varepsilon = -N \frac{d\phi_{mag}}{dt}$.

Si a continuació s'igualen ambdues fórmules tenim que $N d\phi_{mag} = L dI$. Integrant l'equació i tenint en compte que quan $I=0$ el flux és $\phi_{mag} = 0$, la constant d'integració és nul·la i aïllant L obtenim $L = \frac{N\phi_{mag}}{I}$.

Recordant l'equació del flux magnètic d'un inductor, el valor d'inductància resulta $L = \frac{N\phi_{mag}}{I} = \frac{N\mu_0 ANI}{Il} = \frac{\mu_0 N^2 A}{l}$.

El valor d'inductància depèn en gran mesura de la geometria de l'inductor. Per inductors multicapa, l'equació que dona un valor més aproximat d'inductància és l'anomenada equació de Wheeler [Universidad Tecnológica Nacional, Facultad Regional Mendoza, 2013, p.13], en la qual L es calcula com:

$$L = \frac{D^2 N^2}{38D + 114l + 127h} [\mu H] \quad (2.9)$$

On $D(\text{cm})$ és el diàmetre de la bobina, N el número de voltes de l'inductor, $l(\text{cm})$ és la carrera del bobinat i finalment $h(\text{cm})$ és el gruix de les capes del bobinat.

3 Simulació disseny i muntatge

3.1 Base de les bobines

En aquest projecte es vol utilitzar l'estructura de dues bobines concèntriques per tal d'aprofitar la inductància total que aquestes dues formen. Aquesta inductància serà major que la de les dues bobines en sèrie ja que s'aprofita la inductància mútua entre elles. Per tal de poder construir la bobina concèntrica, es necessiten dues bobines, tals que el diàmetre de la bobina interior sigui més petit que el de la bobina exterior. Per a construir aquestes bobines, s'utilitzarà una base cilíndrica per a cada bobina. El material de la base ha de ser un material que no tingui cap efecte sota l'acció del camp magnètic creat per la bobina, ja que això distorsionaria les mesures. També cal destacar que el material amb el que es fixa la bobina petita a l'interior de la bobina exterior és el polietilè expandit o espuma de polietilè, el qual no afecta en la mesura de la inductància.

Per a la bobina exterior una bona opció és utilitzar PVC, ja que aquest no afecta al camp magnètic de la bobina. Un cop escollit el material, es decideix utilitzar una junta de canonades de PVC la qual es pot trobar en qualsevol ferreteria. Dins de les diverses varietats de juntes, s'ha escollit una junta la qual fa 4,605 cm de diàmetre exterior i una llargada de 4,78 cm.



Il·lustració 11.- Detall de la base de PVC de la bobina gran

Per a la bobina interior es té que el diàmetre de la bobina ha de ser inferior a 4.605 cm per tal de poder-la encabir dins de la bobina gran. Per aquest motiu, entre les diverses possibilitats, s'ha escollit que la base de la bobina interior ha de tenir un diàmetre d'1cm. Després de cercar diversos materials que compleixin aquestes característiques, al final s'ha optat per utilitzar el típic rodets de plàstic que s'usa per enrotllar els fils de cosir destinats per a la costura. Aquest material, igual que el de la base de la bobina exterior, no altera el camp magnètic. D'aquesta manera, el rodets escollit té un diàmetre interior d'1 cm i una llargada de 4.5 cm.



Il·lustració 12.- Bobina interior

3.2 Número de voltes i diàmetre del fil

Un cop es tenen definides les bases per ambdues bobines, el pas següent és bobinar en fil de coure la superfície del cilindre. Per tal d'escollir el diàmetre del fil s'ha de tenir en compte que com més petit és el diàmetre del fil utilitzat, més gran es fa la inductància de la bobina. Per aquest motiu, s'ha escollit un fil de coure de diàmetre 0.315mm, ja que el fil de 0,2 mm de diàmetre és massa delicat i podria trencar-se a l'hora de bobinar-lo i el fil de 0.5 mm de diàmetre no permet adaptar-se fàcilment a la forma de la base sobre la qual es bobina. Amb el fil escollit i gràcies a la màquina bobinadora de la que es disposa al laboratori, es fan 1000 voltes de fil de coure al voltant de la base, obtenint com a resultat la bobina desitjada. Cal destacar que el nombre de voltes s'ha escollit tenint en compte que segons treballs anteriors [Brosa, 2013, p.47] com més alt és el nombre de voltes d'una bobina, més alt és el valor de la inductància d'aquesta. S'ha de tenir en compte també que per a nombres molt

elevats de voltes la capacitat paràsitica de la bobina augmenta i en distorsionaria les mesures. Per aquest motiu doncs, s'ha escollit un valor nominal de 1000 voltes.

3.3 Càlcul de la inductància de les bobines per separat

Per a la bobina gran, aplicant un diàmetre exterior de la bobina $D = 5,12$ cm, 1000 voltes, una carrera de bobinat de 4,6 cm i un espessor del bobinat de 0,26 cm a l'equació (2.9) obtenim un valor d'inductància de 34,85 mH.

Per a la bobina interior, aplicant un diàmetre exterior de la bobina $D = 1,96$ cm, 1000 voltes, una carrera de bobinat de 4,5 cm i un espessor del bobinat de 0,55 cm a l'equació (2.9) obtenim un valor d'inductància de 5,25 mH.

Els valors de les dues bobines per separat també s'han simulat amb el programa FEMM 4.2. Amb aquest programa de simulació per elements finits, hem obtingut per a la bobina gran una inductància de 30,66 mH i per a la bobina interior una inductància de 4,99 mH.

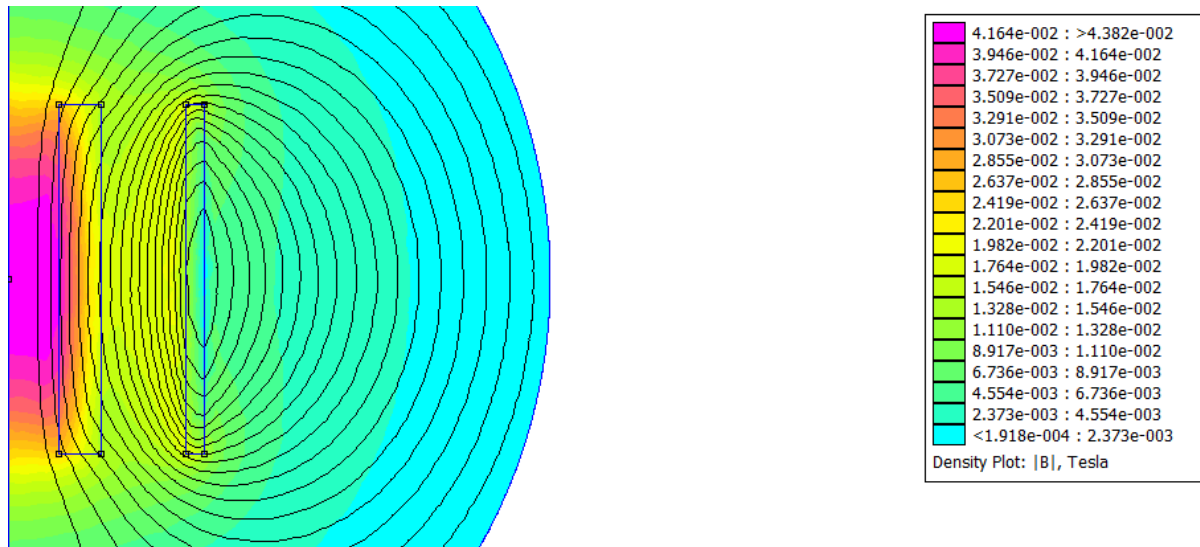
Val a dir que el valor de les simulacions amb el valor teòric de l'aproximació de Wheeler és similar per ambdós casos, essent la diferència màxima entre ells del 12% en el cas de la bobina gran i del 4,9% en la bobina interior.

Finalment, per acabar amb les dues bobines per separat, es mesura la inductància per a cada bobina amb l'analitzador d'impedàncies HP4192A obtenint una inductància de 33,32 mH per a la bobina gran i 5,28 mH per a la bobina interior.

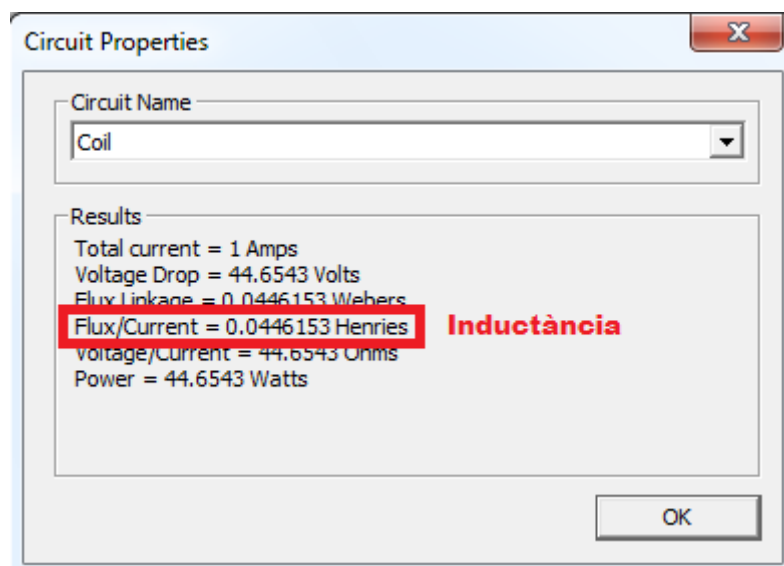
3.4 Simulació i càlcul de la inductància de les bobines concèntriques

Un cop s'ha estudiat el comportament de les bobines per separat, és hora d'unir-les. Per a aquest fet hi ha dues possibilitats d'unió entre elles. La primera opció és col·locar-les en la mateixa direcció de bobinat, és a dir, que el sentit del bobinat del fil de la bobina interior, sigui el mateix sentit de gir que el de la bobina exterior. D'aquesta manera, el camp generat per una bobina i per l'altra, tindrà el mateix sentit i la inductància total serà la suma de la

inductància de la bobina gran, el de la bobina petita i la inductància mútua entre ambdues. Com a resultat, i tal i com es pot observar en la simulació, el flux de camp magnètic augmentarà i com a conseqüència la inductància total de la bobina concèntrica augmentarà.



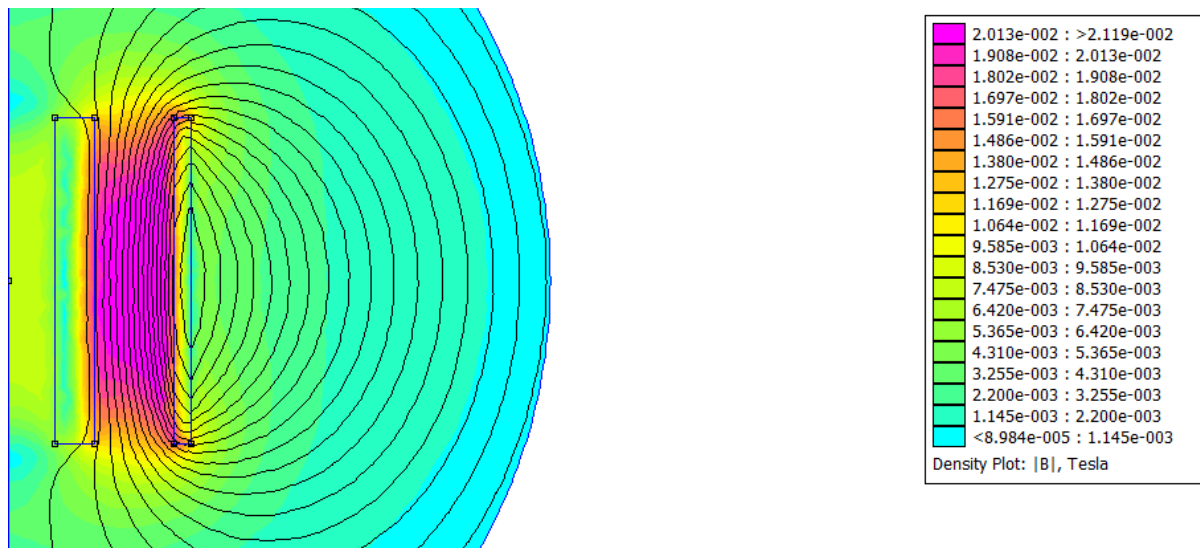
Il·lustració 13.- Detall de la simulació axisimètrica de la bobina concèntrica amb el mateix sentit de bobinat per ambdues bobines amb el programa FEMM 4.2



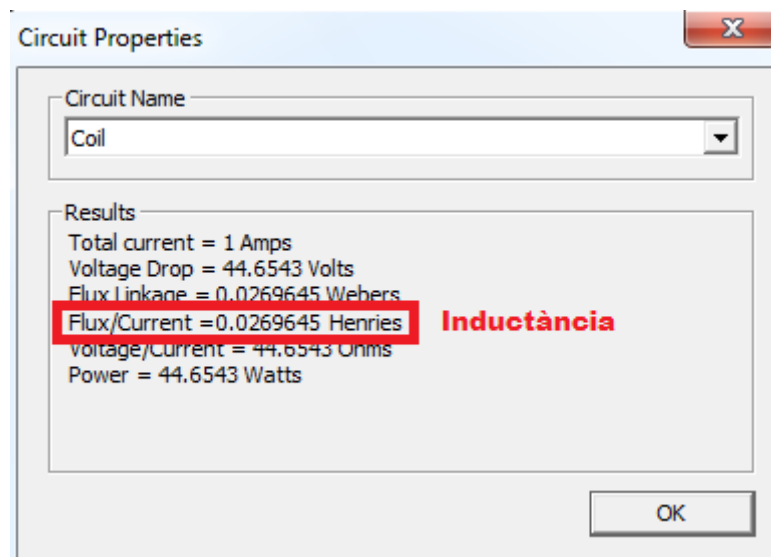
Il·lustració 14.- Detall de la inductància resultant de la simulació amb el programa FEMM 4.2

Per altra banda, la segona opció és col·locar-les en diferent direcció de bobinat, és a dir,

que el sentit del bobinat del fil de la bobina interior, sigui el contrari que el de la bobina exterior. D'aquesta manera, el camp generat per una bobina i per l'altra, tindrà el sentit oposat i la inductància total serà la resta de la inductància de la bobina gran, el de la bobina petita i la inductància mútua entre ambdues. Com a resultat, i tal i com es pot observar en la simulació, el flux de camp magnètic disminuirà i es situarà entre les dues bobines. Com a conseqüència, la inductància total de la bobina concèntrica serà més petita



Il·lustració 15.- Detall de la simulació axisimètrica de la bobina concèntrica amb el mateix sentit de bobinat per ambdues bobines



Il·lustració 16.- Detall de la inductància resultant de la simulació amb el programa FEMM 4.2

Així doncs, veient la intensitat de flux, la inductància i la disposició del màxim de camp magnètic en ambdós casos, s'ha escollit la primera opció ja que és la que més resposta, en termes d'inductància, ens proporciona.

Finalment es mesura la inductància de les bobines concèntriques amb l'analitzador d'impedàncies HP4192A obtenint una inductància de 44,54 mH a 1 kHz de freqüència, un valor molt proper als 44,61 mH que ens donava la simulació.

3.5 Estudi del comportament de la bobina gran

Abans d'ajuntar les dues bobines, cal estudiar-ne el comportament per separat. En aquest cas s'agafarà la bobina exterior ja que és la que més inductància presenta i serà més fàcil veure'n els efectes que produeix.

3.5.1 Comportament de la inductància de la bobina amb la distància

Un cop sabem com és el camp magnètic sense cap objecte a prop de la bobina, el següent pas és caracteritzar la resposta de la inductància amb la influència d'un material ferromagnètic en funció de la distància en la que aquest es troba.

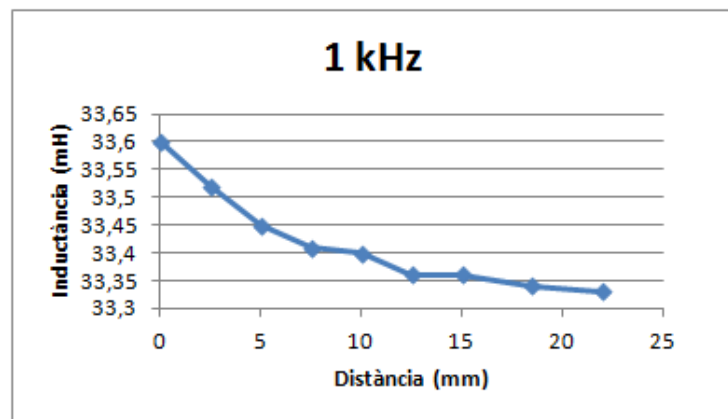
Per a realitzar aquesta prova, el que s'ha utilitzat ha sigut un feix pla de fibres d'acer com el que s'observa a la il·lustració 17, el qual conté tot de fibres planes curtcircuitades en els extrems.



Il·lustració 17.- Pla de fibres utilitzat per al càlcul de la inductància en funció de la distància

La prova ha consistit en col·locar la bobina sobre les fibres i, amb l'ajuda d'uns separadors que no afecten al camp magnètic, s'ha anat allunyant la bobina del pla i s'ha anat mesurant la inductància d'aquesta en funció de la distància en la que es trobava del pla de fibres. A continuació es detalla en una taula i en una gràfica la variació d'inductància obtinguda respecte el buit

Distància (mm)	Inductància a 1kHz (mH)	% relació
buit	33,32	0
0	33,6	0,84
2,5	33,52	0,60
5	33,45	0,39
7,5	33,41	0,27
10	33,4	0,24
12,5	33,36	0,12
15	33,36	0,12
18,5	33,34	0,06
22	33,33	0,03

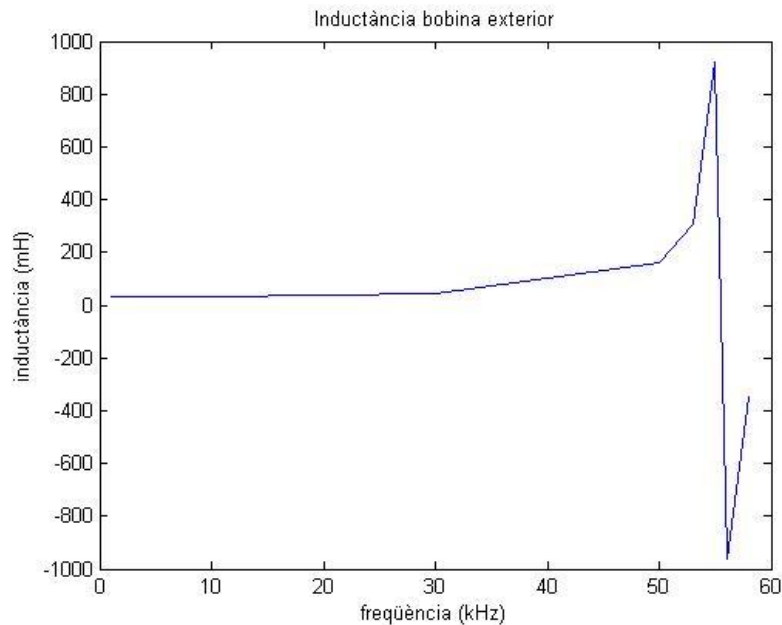


Il·lustració 18.- Taula i gràfica de la variació d'inductància en funció de la distància a un pla de fibres

Tal i com es pot observar, a 1 kHz hi ha molt poca variació entre la inductància anomenada en el buit (quan no hi ha el pla de fibres a prop) i la inductància que hi ha quan el pla de fibres interactua amb la bobina: un 0,84%.

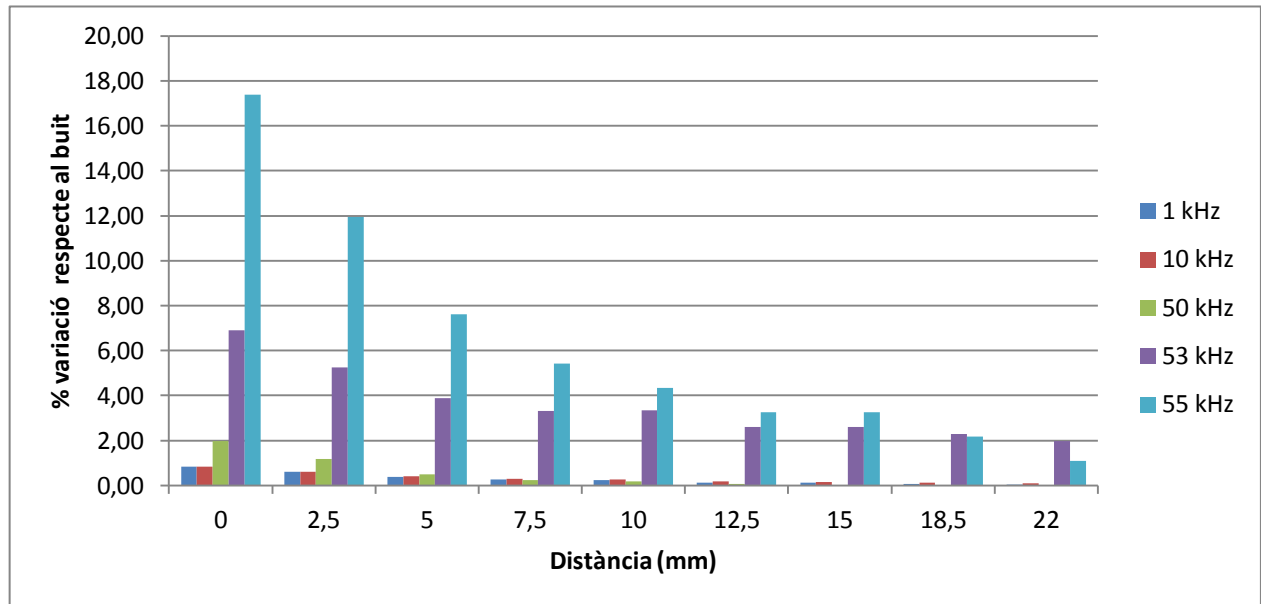
Per aquest motiu, el següent pas és realitzar un escombrat de freqüències per saber la resposta inductiva de la bobina. En la il·lustració 19 es pot observar que en l'eix d'abscisses

trobem el valor de freqüència en kHz, mentre que en l'eix d'ordenades trobem el valor d'inductància en mH. El primer que s'observa és que a 55,3kHz, la bobina passa a comportar-se com un condensador, i la bobina ja no actua com a tal.



Il·lustració 19.- Inductància mesurada per a la bobina exterior a diferents freqüències

Un cop vist el comportament en la gràfica, es pot deduir que a freqüències a prop de la freqüència de ressonància, el valor de la inductància creix exponencialment. Per aquest motiu, és important fer la mateixa prova que s'ha fet amb el pla de fibres a 1kHz a diferents freqüències, per veure si influeix aquest augment de valor de la inductància en la detecció de les fibres. En la il·lustració 20 es pot observar el percentatge de variació de la bobina amb les fibres a diferents distàncies respecte el seu valor sense presència de fibres a diferents freqüències. El fet més destacable és l'augment de la inductància i de la variació amb la presència de fibres respecte a les baixes freqüències.



Il·lustració 20.- Gràfica de la variació d'inductància en funció de la distància a un pla de fibres a diferents freqüències

En aquesta gràfica s'observa que com més a prop de la freqüència de ressonància es trobi la bobina, es té més detecció de les fibres: es passa d'un 0,84% a un 17,39% de diferència amb les fibres a 0 mil·límetres a 1 kHz i a 55 kHz respectivament. Així doncs, tot indica que com més a prop de la freqüència de ressonància es trobi la bobina es podran detectar les fibres d'acer amb més claredat i més profunditat.

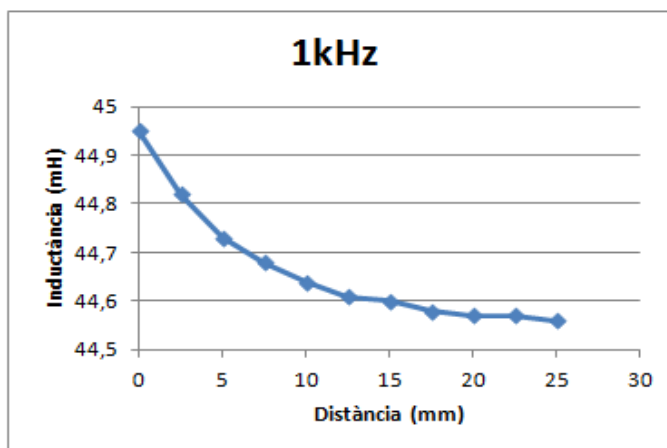
3.6 Comportament de la inductància de la bobina concèntrica amb la distància

Tal i com s'ha fet en el cas de la bobina gran, el següent pas és caracteritzar la resposta de la inductància amb la influència d'un material ferromagnètic en funció de la distància en la que aquest es troba.

Per a realitzar aquesta prova, s'ha utilitzat el pla de fibres d'acer utilitzat en les proves de la bobina exterior. La prova ha consistit en col·locar la bobina sobre les fibres i, amb l'ajuda d'uns separadors que no afecten al camp magnètic, s'ha anat allunyant la bobina del pla i

s'ha anat mesurant la inductància d'aquesta en funció de la distància en la que es trobava del pla de fibres. A continuació es detalla en una taula i en una gràfica la variació d'inductància obtinguda respecte el buit a 1 kHz:

Distància (mm)	Inductància a 1kHz (mH)	% relació
buit	44,54	0
0	44,95	0,92
2,5	44,82	0,63
5	44,73	0,43
7,5	44,68	0,31
10	44,64	0,22
12,5	44,61	0,16
15	44,6	0,13
17,5	44,58	0,09
20	44,57	0,07
22,5	44,57	0,07
25	44,56	0,04

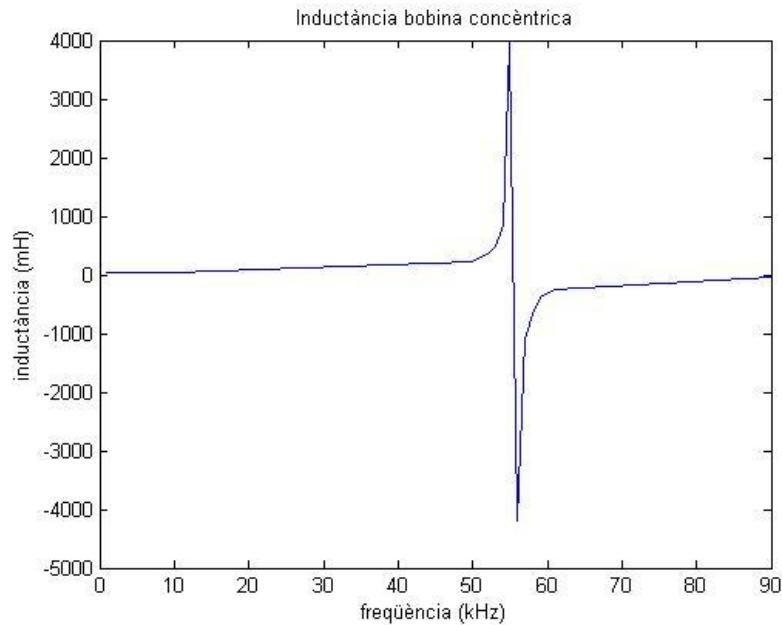


Il·lustració 21.- Taula i gràfica de la variació d'inductància de la bobina concèntrica en funció de la distància a un pla de fibres

Tal i com es pot observar, com en la bobina exterior del cas anterior, tot i ser una mica major; a 1 kHz hi ha molt poca variació entre la inductància anomenada en el buit (quan no hi ha el pla de fibres a prop) i la inductància que hi ha quan el pla de fibres interactua amb la bobina: un 0,92%⁴.

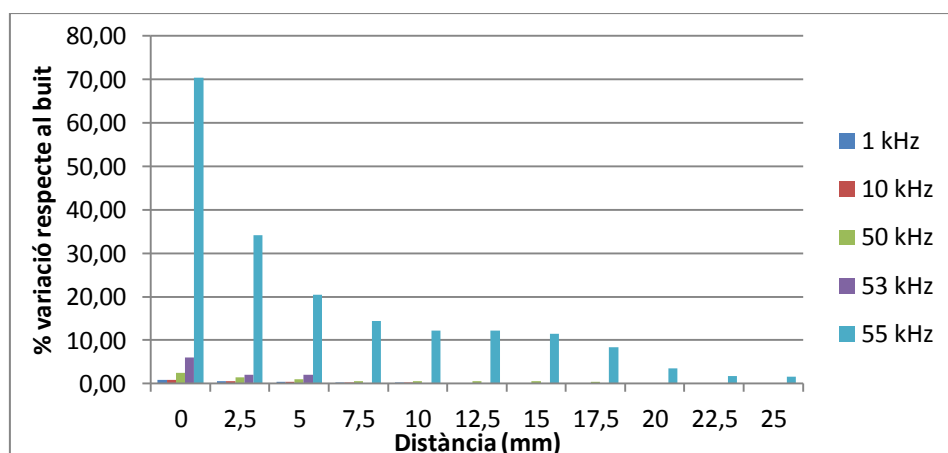
Per aquest motiu, com en el cas de la bobina exterior, el següent pas és realitzar un escombrat de freqüències per saber la resposta inductiva de la bobina. En la il·lustració 22 es pot observar que en l'eix d'abscisses trobem el valor de freqüència en kHz, mentre que en l'eix d'ordenades trobem el valor d'inductància en mH. El primer que s'observa és que a 55,3kHz, la bobina passa a comportar-se com un condensador, i la bobina ja no actua com a tal.

⁴ Cal recordar que en el cas de la bobina exterior la variació era d'un 0.84%, un 0.08% menys que en el cas de la bobina concèntrica.



Il·lustració 22.- Inductància de la bobina concèntrica en funció de la freqüència

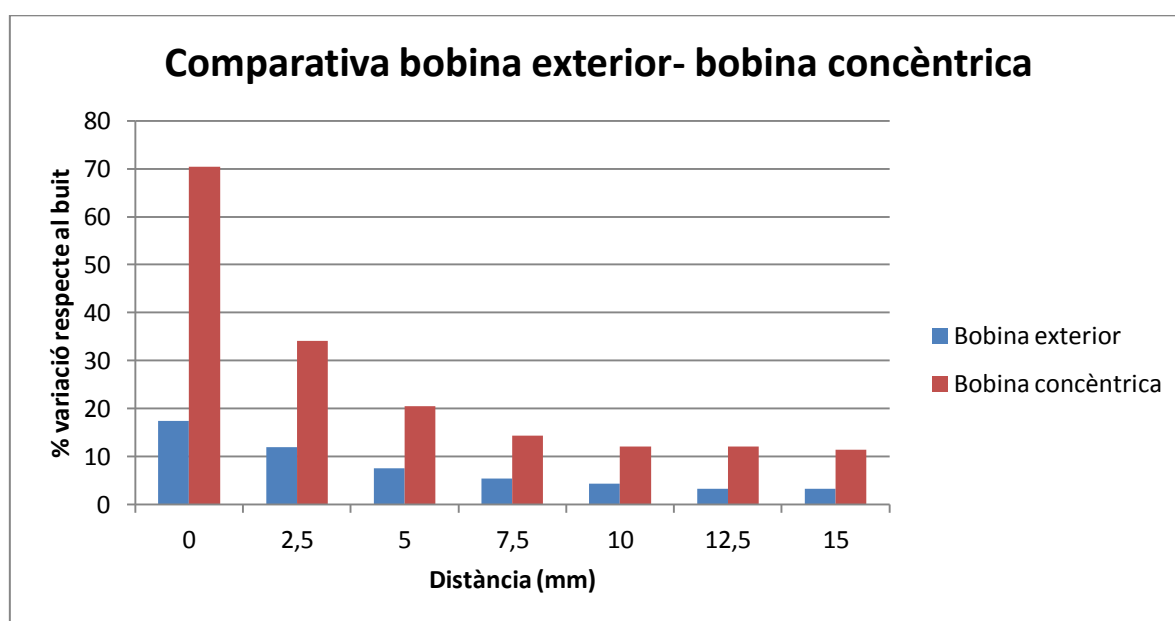
Un cop vist el comportament en la gràfica, com en el cas de la bobina exterior, es pot deduir que a freqüències a prop de la freqüència de ressonància, el valor de la inductància creix exponencialment. Per aquest motiu, és important fer la mateixa prova que s'ha fet amb el pla de fibres a 1kHz a diferents freqüències, per veure si influeix aquest augment de valor de la inductància en la detecció de les fibres i aquest és major en el cas de la bobina concèntrica. En la il·lustració 23 es pot observar el percentatge de variació de la bobina amb les fibres a diferents distàncies i el seu valor sense presència de fibres a diferents freqüències.



Il·lustració 23.- Gràfica de la variació d'inductància en funció de la distància a un pla de fibres a diferents freqüències

En aquesta gràfica, de forma similar a la bobina exterior, s'observa que com més a prop de la freqüència de ressonància es trobi la bobina, es té més detecció de les fibres: es passa d'un 0,92% a un 70,38% de diferència amb les fibres a 0 mil·límetres a 1 kHz i a 55 kHz respectivament.

Si a continuació es compara per al cas de més detecció (55 kHz) la diferència amb el buit entre la bobina exterior i la bobina concèntrica, s'obtenen unes diferències del 52,99% absolut en el cas de tenir les fibres a 0 mm de la bobina. En la il·lustració 24 es poden veure detallades les diferències per a cada distància en el cas de màxima detecció.



Il·lustració 24.- Gràfica comparativa de la variació d'inductància respecte al buit en el cas de 55 kHz entre la bobina exterior i la bobina concèntrica

Vistos els resultats⁵ i la comparativa entre una bobina sola, en aquest cas l'exterior; i la bobina concèntrica, resulta clarament favorable utilitzar l'estructura de les bobines concèntriques, ja que es disposa de més diferència en la detecció de fibres respecte el buit.

Finalment, cal destacar que les mesures s'han realitzat amb la bobina concèntrica col·locada de tal manera que el buit del centre de la bobina quedés perpendicular al pla de fibres. Una altra opció seria col·locar la bobina tombada, és a dir, amb el buit del centre de la bobina en paral·lel al pla de fibres. D'aquesta manera la inductància mesurada és superior al cas anterior, però tot i tenir més sensibilitat, la mesura solament és vàlida si tota

⁵ A l'annex es pot observar la comparativa entre les dues arquitectures de bobines per a totes les freqüències.

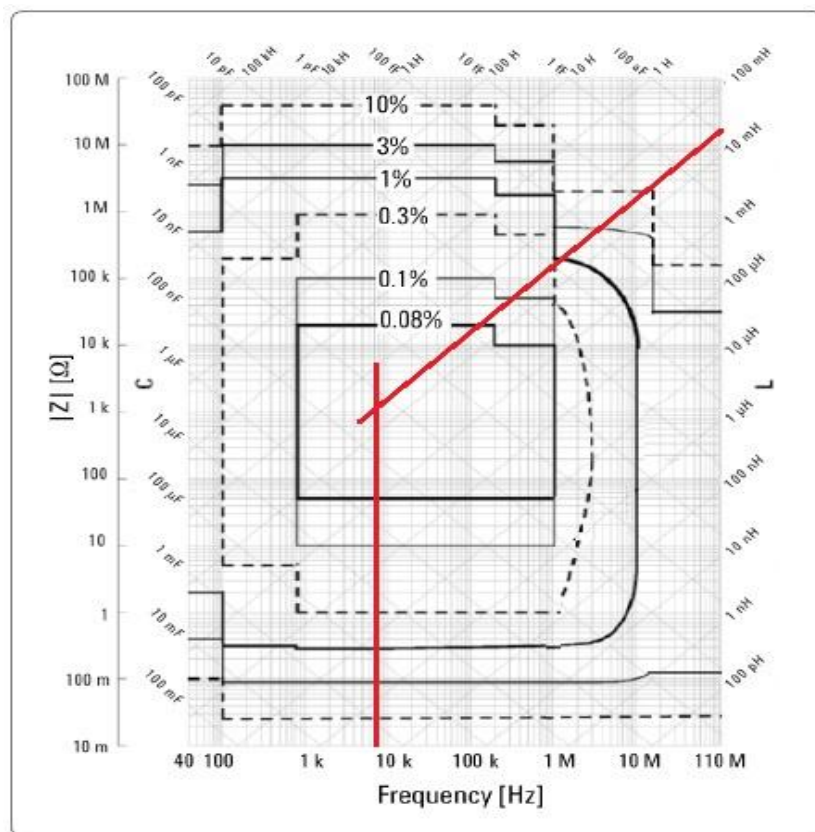
la bobina està a sobre del pla de fibres. En el cas que hi hagi un desplaçament de la bobina cap a un dels extrems d'aquest pla, el valor d'inductància baixa considerablement, essent aquest inferior al mesurat pel mètode anterior. Així doncs, donat aquest fet que no succeeix en el cas que la bobina no estigui tombada i gràcies a la fàcil repetibilitat que ofereix, es decideix realitzar totes les proves amb la bobina dreta.

3.7 Freqüència utilitzada

Seguint l'estudi anterior, resulta lògic pensar que a una freqüència pròxima a la freqüència de ressonància es tindrà més resolució que a freqüències baixes. Però per acabar determinant la freqüència que s'usarà s'ha de tenir en compte la regió de treball de l'aparell de mesura, ja que segons a quines freqüències es treballi, l'analitzador d'impedàncies HP4192A tindrà més exactitud o menys.

En la il·lustració 25 es poden contemplar les regions de treball de l'analitzador HP4192A, extretes del seu full d'especificacions⁶. En ella es pot observar que l'analitzador treballa correctament amb una exactitud del 0,08% en les freqüències que van des de 1 kHz a 1 MHz. Com la inductància de la bobina concèntrica és de 44,61 mH, i es vol la màxima exactitud, s'ha escollit finalment que es treballi a 10 kHz tal i com es pot observar en la il·lustració 25.

⁶ Disponible en el punt 2 de la bibliografia



Il·lustració 25.- Especificacions de l'exactitud en la mesura de l'analitzador d'impedàncies HP4192A

Un cop escollida la freqüència de treball i veient que a freqüències pròximes a la freqüència de ressonància és quan tenim més resposta de la bobina en termes d'inductància, el següent pas és intentar portar la freqüència de ressonància a una freqüència pròxima a la freqüència de treball. D'aquesta manera s'obtindrà màxima resposta inductiva a la freqüència de treball.

Per fer possible aquest trasllat de freqüència de ressonància es farà ús d'un condensador col·locat en paral·lel a la bobina, el qual adquirirà el mateix valor en mòdul d'impedància que la bobina. D'aquesta manera i segons la pròpia definició de freqüència de ressonància s'obtindrà que $Z_0 = R_0 + jX_0$ on $X_0=0$ ja que $X_0 = X_C + X_L$ on $X_C = -X_L$.

Així doncs, sabent que $L_{10\text{kHz}} = 44.64 \text{ mH}$ es calcula $|Z| = 2\pi \cdot f \cdot L = 2\pi \cdot 10000 \cdot 44,64 \cdot 10^{-3} = 2804,81 \Omega$.

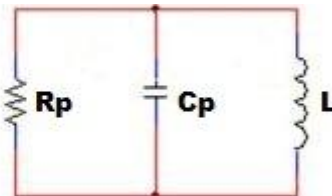
Si es vol que $|Z_c| = |Z_L|$ i sabent que $|Z_c| = \frac{1}{2\pi f C}$, si s'aïlla C s'obté que

$$C = \frac{1}{2\pi f |Z_c|} = \frac{1}{2\pi \cdot 10^4 \cdot 2804,81} = 5,674 \text{ nF}$$

Finalment, observant el catàleg de condensadors disponibles, s'ha escollit un condensador de 5.6nF, el qual provoca que al col·locar-lo la freqüència de ressonància es situï ara a 11,15 kHz, freqüència molt pròxima als 10 kHz de freqüència de treball. Cal destacar que un cop col·locat el condensador, al realitzar les mesures, aquestes son molt sensibles a petites variacions de l'entorn. Per aquest motiu s'ha fet un estudi del comportament del sistema que es troba disponible en l'annex B.

3.8 Circuit equivalent

El nostre sistema, a part d'estar format per una bobina i un condensador en paral·lel, presenta una resistència deguda a la longitud del cable. Aquesta resistència deguda al fil fa que el circuit equivalent del sistema sigui el d'una resistència, un condensador i una bobina en paral·lel tal i com es veu en la il·lustració 26.



Il·lustració 26.- Circuit equivalent RLC paral·lel

4 Resultats de les mesures

4.1 Detecció de fibres a diferents distàncies de la bobina

En aquest apartat es comprova la capacitat que té la bobina de detectar fibres que es troben a una certa distància. Aquestes mesures serveixen per tenir una idea aproximada de la profunditat de penetració que té la bobina per poder detectar fibres dins el formigó, i poder realitzar mesures superficials sobre lloses de formigó amb fibres.

Aquesta prova s'ha dividit en dues parts. La primera detecta un feix pla de fibres a diferents distàncies de la bobina, tal i com s'ha fet prèviament amb la bobina exterior i la bobina concèntrica sense el condensador. La segona part detecta un feix de 19 fibres agrupades formant-ne una de més gran.

La mecànica de les dues proves serà exactament la mateixa. Primer de tot es mesura la inductància de la bobina sense cap element pertorbador al voltant per tenir una referència del que serà el valor nominal de la bobina. A continuació es col·loquen les fibres sota de la bobina, de forma centrada i, des d'una distància de 0 mm fins a una distància de 25 mm amb intervals de 2,5 mm, es mesura la inductància de la bobina. Finalment, es recullen les dades de les 12 mesures i s'estudia el canvi d'inductància que provoquen aquestes fibres sobre el valor nominal d'inductància mesurat prèviament. Cal destacar que la col·locació de les fibres ha de ser sempre la mateixa durant tota la prova ja que qualsevol modificació de la seva posició afectaria de forma notòria el resultat de les mesures. Segons els estudis realitzats en la part teòrica, en les mesures de calibratge i en les simulacions, el màxim d'inductància en un pla de fibres o en el feix es produeix amb les fibres col·locades just a sota del centre de la bobina.

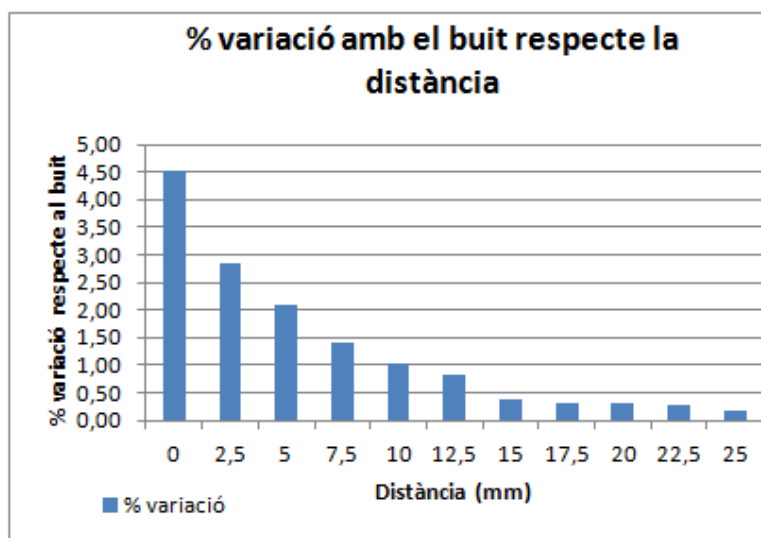
4.1.1 Detecció del pla de fibres a diferents distàncies de la bobina

Per fer aquesta prova s'ha utilitzat un conjunt de fibres dipositades una al costat de l'altra de forma paral·lela, tot formant un quadrat pla de fibres de costat igual al diàmetre de la bobina. Finalment, s'ha col·locat a cada un dels dos extrems de les fibres, de forma perpendicular, una fibra per a tal de fer un curtcircuit del conjunt tal i com s'ha fet en les proves anteriors.

Per aconseguir fer les mesures constants a les diferents distàncies, s'han utilitzat un conjunt de plaques de gruixos de 2,5 mm i 5 mm, fetes de un compost de plàstic de tipus ABS i PMMA, uns materials que no afecta al camp magnètic generat per la bobina.

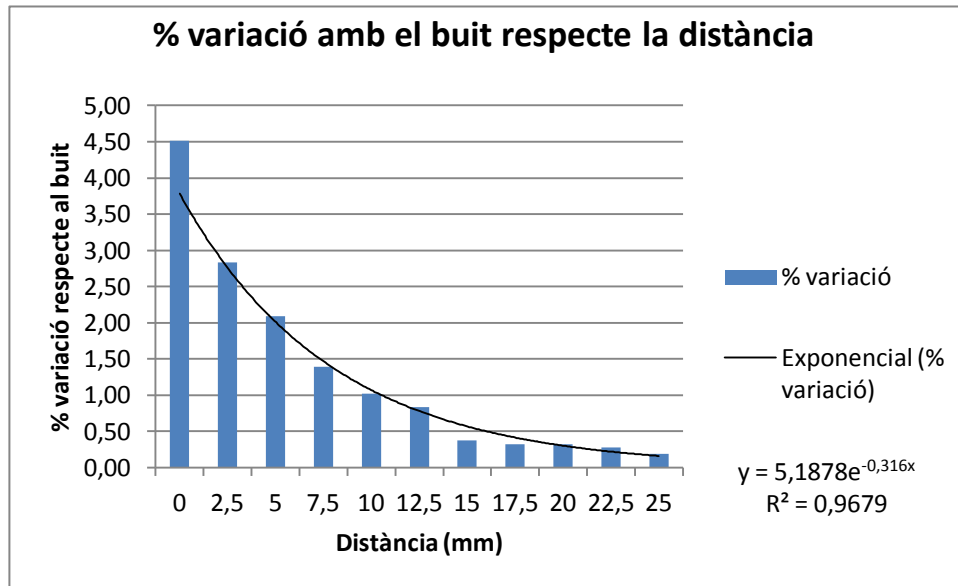
En la il·lustració 27 tenim la taula i la gràfica dels resultats obtinguts. En l'eix d'ordenades de la gràfica trobem el valor d'inductància mesurat, mentre que en l'eix d'abscisses trobem la distància en la qual es troben les fibres. El valor d'inductància en el cas en que les fibres es troben a 0 mm és 224,7 mH, un 4,51% més que el valor de la inductància de la bobina quan no hi ha cap fibra al voltant: 215 mH. A partir de 2,5 mm fins a 15 mm es pot observar que el valor de la inductància disminueix de forma exponencial, arribant a un valor de 215,8 mH, essent aquest valor tant sols un 0.37% superior al valor en el buit. A partir de 15 mm fins als 25 mm, distància final de la prova, i seguint la progressió exponencial negativa, s'observa que la disminució de la inductància en la distància és mínima, tant sols varia 0,3 mH en 1 cm de profunditat. Aquest fet, en el cas del pla de fibres, provocaria que si es volgués saber la profunditat de les fibres donat un valor nominal al buit i el valor mesurat només fós possible fins a distàncies de 15 mm ja que a més profunditat la simple variació de la dècima de mH podria ser deguda a l'error del mateix aparell de mesura o la diferent col·locació de les fibres entre una mesura i la següent.

Distància (mm)	Inductància a 10kHz (mH)	% relació
<i>buit</i>	215	0
0	224,7	4,51
2,5	221,1	2,84
5	219,5	2,09
7,5	218	1,40
10	217,2	1,02
12,5	216,8	0,84
15	215,8	0,37
17,5	215,7	0,33
20	215,7	0,33
22,5	215,6	0,28
25	215,4	0,19



Il·lustració 27.- Taula i gràfica de la variació d'inductància de la bobina concèntrica en funció de la distància a un pla de fibres

Finalment, tal i com es pot intuir en la gràfica, podem modelar aquests resultats amb una aproximació per una funció exponencial on la variable independent sigui la distància i la variable dependent sigui el percentatge de variació d'inductància respecte al valor nominal. Gràcies a l'ajuda del programa de processament de dades Excel obtenim la funció $Variació(x) = 5,1878 \cdot e^{-0,316x}$ on la variable x és la distància de les fibres respecte la bobina. Aquesta funció s'adapta bastant bé amb les dades reals extretes de la prova, prova d'això ho reflexa el coeficient de determinació R^2 que ens proporciona el mateix programa. Aquest coeficient, que oscil·la entre 0 i 1 ens informa del percentatge en tant per 1, de la variabilitat que presenta l'aproximació utilitzada. També és conegut com el coeficient de correlació al quadrat. Així doncs, en el nostre cas ens dona un coeficient de 0,9679 tal i com es pot veure en la il·lustració 28.



Il·lustració 28.- Aproximació exponencial del % de variació en el buit respecte la distància

4.1.2 Detecció del feix de fibres a diferents distàncies de la bobina

Per fer aquesta prova s'ha utilitzat un conjunt de 19 fibres agrupades en forma de feix de tal manera que el conjunt formi una fibra més gran. Aquesta prova es realitza per saber com afecta la superfície de l'objecte de mesura al valor de la inductància. En la il·lustració 29 es pot observar amb detall com ha resultat aquest feix de fibres.



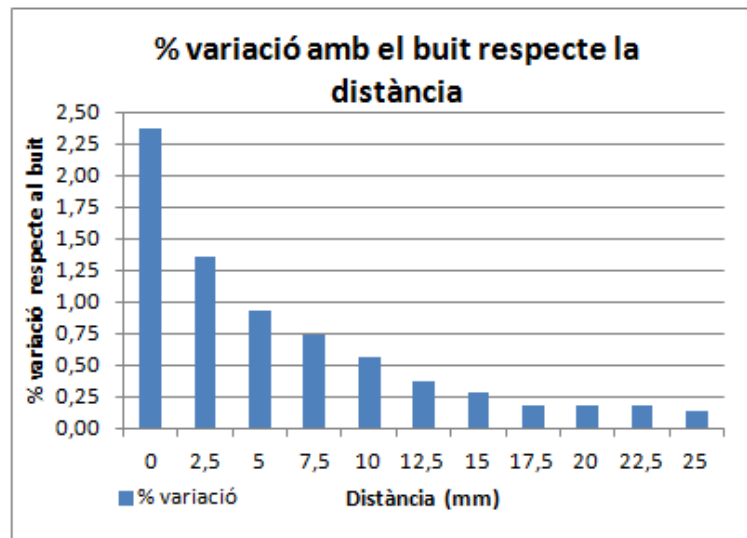
Il·lustració 29.- Detall del feix de fibres utilitzat

De la mateixa manera que en la prova anterior, per aconseguir fer les mesures constants a

les diferents distàncies, s'han utilitzat un conjunt de plaques de gruixos de 2,5 mm i 5 mm, fetes d'un compost de plàstics del tipus ABS i PMMA, un material que no afecta al camp magnètic generat per la bobina. En aquest cas, per mantenir l'equilibri de la bobina sobre el feix de fibres, s'han col·locat uns suports a cada costat del feix de fibres del mateix material que les plaques. D'aquesta manera podem col·locar les plaques i realitzar la prova de forma idèntica al cas anterior.

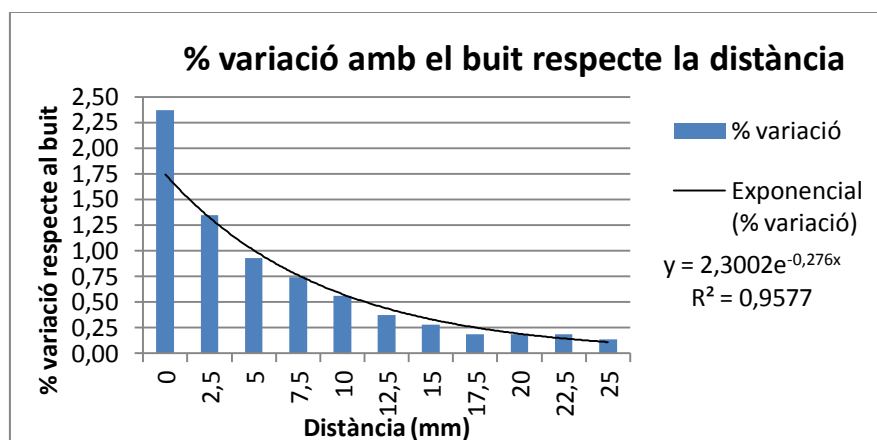
En la il·lustració 30 tenim la taula i la gràfica dels resultats obtinguts. En l'eix d'ordenades de la gràfica trobem el valor de la diferència respecte el buit del valor d'inductància mesurat, mentre que en l'eix d'abscisses trobem la distància en la qual es troben les fibres. El valor d'inductància en el cas en que les fibres es troben a 0 mm és 220,1 mH, un 2,37 % més que el valor de la inductància de la bobina quan no hi ha cap fibra al voltant: 215 mH. A partir de 2,5 mm fins a 15 mm es pot observar que el valor de la inductància disminueix de forma exponencial, arribant a un valor de 215,6 mH, essent aquest valor tant sols un 0,28 % superior al valor en el buit. A partir de 15 mm fins als 25 mm, distància final de la prova, i seguint la progressió exponencial negativa, s'observa que la disminució de la inductància en la distància és mínima, tant sols varia 0,3 mH en 1 cm de profunditat. Aquest fet, en el cas del pla de fibres, provocaria que si es volgués saber la profunditat de les fibres donat un valor nominal al buit i el valor mesurat només fós possible fins a distàncies de 15 mm ja que a més profunditat la simple variació de la dècima de mH podria ser deguda a l'error del mateix aparell de mesura o la diferent col·locació de les fibres entre una mesura i la següent.

Distància (mm)	Inductància a 10kHz (mH)	% relació
buit	215	0
0	220,1	2,37
2,5	217,9	1,35
5	217	0,93
7,5	216,6	0,74
10	216,2	0,56
12,5	215,8	0,37
15	215,6	0,28
17,5	215,4	0,19
20	215,4	0,19
22,5	215,4	0,19
25	215,3	0,14



Il·lustració 30.- Taula i gràfica de la variació d'inductància de la bobina concèntrica en funció de la distància a un pla de fibres

Finalment, tal i com es pot intuir en la gràfica i s'ha fet en la prova anterior, podem modelar aquests resultats amb una aproximació per una funció exponencial on la variable independent sigui la distància i la variable dependent sigui el percentatge de variació d'inductància respecte al valor nominal. Gràcies a l'ajuda del programa de processament de dades Excel obtenim la funció $Variació(x) = 2,3002 \cdot e^{-0,276x}$ on la variable x és la distància de les fibres respecte la bobina. Aquesta funció s'adapta bastant bé amb les dades reals extretes de la prova, prova d'això ho reflexa el coeficient de determinació R^2 que ens dona 0,9577 tal i com es pot veure en la il·lustració 31.



Il·lustració 31.- Aproximació exponencial del % de variació amb el buit respecte la distància

4.1.3 Comparativa dels resultats

Un cop es tenen els resultats de les dues proves de la distància és hora de comparar-ne els resultats.

En primer lloc, si es miren els valors de la inductància en ambdós casos es pot observar que en el cas del pla de fibres la inductància és sensiblement superior al cas del feix de fibres, degut al nombre de fibres i la seva disposició en cada cas. Tal i com es pot veure en la il·lustració 32, si s'agafen els valors de la inductància en un cas i en l'altre, es pot veure que tot i que al principi la diferència a 0 mm és de 4,6 mH, a partir de 15 mm les diferències entre el pla de fibres i el feix ja són mínimes: entre 0,3 i 0,1 mH. Com s'ha dit abans, aquestes mínimes diferències ja no són significatives, ja que poden ser causades per la mateixa sensibilitat i precisió de l'analitzador d'impedàncies.

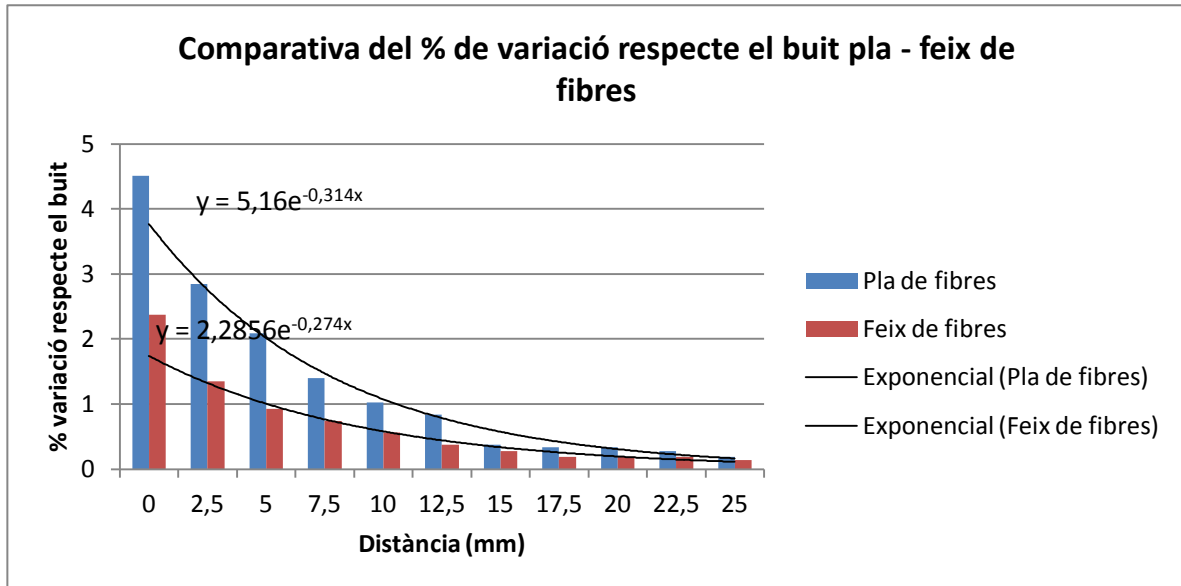
Distància (mm)	Inductància en el Pla (mH)	Inductància en el Feix (mH)	Diferència (%)
buit	215	215	0
0	224,7	220,1	4,6
2,5	221,1	217,9	3,2
5	219,5	217	2,5
7,5	218	216,6	1,4
10	217,2	216,2	1,0
12,5	216,8	215,8	1,0
15	215,8	215,6	0,2
17,5	215,7	215,4	0,3
20	215,7	215,4	0,3
22,5	215,6	215,4	0,2
25	215,4	215,3	0,1

Il·lustració 32.- Taula comparativa dels resultats de les dues proves

Si s'observa ara la diferència entre el percentatge de variació amb el buit per ambdós casos, es pot veure que tot i que es poden considerar vàlids per a distàncies inferiors a 15 mm, a partir d'aquesta distància la variació en els dos casos és mínima.

L'objectiu d'aquestes dues proves ha sigut determinar si el comportament de la inductància entre una superfície que cobris tota la base de la bobina i un feix de fibres que no ocupés tota la superfície de la base era el mateix salvant la diferència de valor absolut del camp.

Així doncs, com es pot observar en la il·lustració 33, per els dos casos el comportament és una exponencial i salvant el terme multiplicador de l'exponencial, ambdues funcions són molt similars: en al cas del pla de fibres es té $e^{-0,316x}$ i en el cas del feix de fibres es té $e^{-0,276x}$.



Il·lustració 33.- Gràfica comparativa del percentatge de variació respecte el buit entre el pla i el feix de fibres

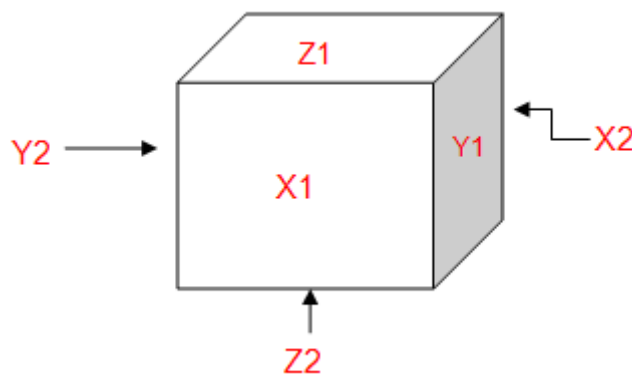
Finalment, es pot concloure que el comportament de la nostra bobina respecte a un conjunt de fibres en funció de la distància serà exponencial negatiu al llarg de la distància sigui quina sigui la disposició del conjunt de fibres que s'analitzin.

4.2 Mesura de provetes amb diferents concentracions de fibres

En aquest apartat es comprova la resposta inductiva que té la bobina al detectar diferents concentracions de fibres dins de les provetes cúbiques de formigó de 15 cm de costat. Aquestes mesures serviran per tenir una idea aproximada de com afecten les diferents concentracions de fibres d'acer en la bobina dissenyada i poder així tenir un altre criteri a l'hora de poder detectar les fibres i fer-ne les mesures.

Per a la realització d'aquesta prova s'utilitzen tres provetes de formigó diferents que contenen una concentració de fibres de 20 kg/m^3 , 40 kg/m^3 i 60 kg/m^3 respectivament.

Tot i ser mesures superficials, per poder detectar les fibres de les provetes s'han de mesurar els tres eixos del cub, ja que la bobina pràcticament no detecta les fibres que es troben perpendiculars a les línies de camp magnètic. D'aquesta manera també es podrà determinar el contingut de fibres orientades en cada eix. Cal destacar que les cares es consideren seguint la il·lustració 34, quedant les cares del mateix eix paral·leles dos a dos. Aquesta última dada és d'un gran interès ja que caracteritzant l'orientació de les fibres en els eixos es podrà saber quina proveta serà més indicada per suportar uns determinats esforços i, a més, permetrà saber l'orientació mitja de les fibres sense la necessitat d'haver de fer un assaig destructiu.

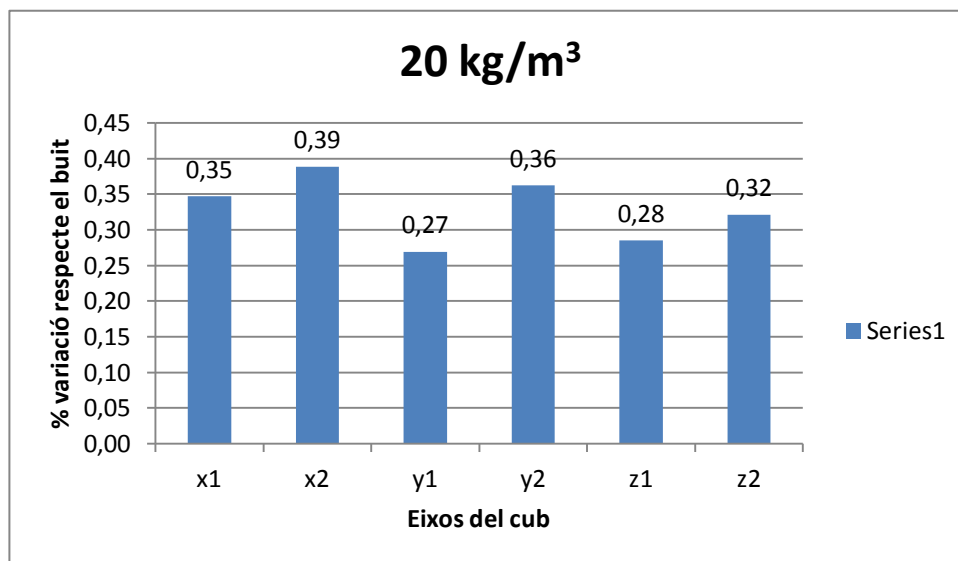


Il·lustració 34.- Disposició de les cares de la proveta de formigó

Finalment, es realitzen les mesures en cada una de les 6 cares del cub per obtenir així el valor mig de la inductància en cada un dels eixos. Cal destacar que cada cara s'ha dividit en 9 quadrats de mesura de costat igual al diàmetre de la bobina i el valor mig de cara cada és la mitjana d'aquestes 9 mesures. Un cop obtinguts aquests valors, es calcula el valor mig de la variació d'inductància en la proveta seleccionada per a cada una de les proves.

4.2.1 Mesura de la proveta de 20 kg/m³

En la il·lustració 35 es pot observar la variació d'inductància mitja per a cada una de les cares de la proveta. En l'eix d'abscisses hi trobem cada una de les cares de la proveta i en l'eix d'ordenades el percentatge de variació respecte el buit. Tal i com s'observa el percentatge de variació respecte el buit de cada una de les cares és molt similar: oscil·la entre 0,27 % i 0,39 % respecte el valor nominal mesurat i, si es tenen en compte les dues mesures per a cada cara, en aquest cas tenim que la orientació prioritària de les fibres segueix la cara X⁷.



Il·lustració 35.- Gràfica del percentatge de variació d'inductància respecte el buit de cada una de les cares de la proveta de 20 kg/m³

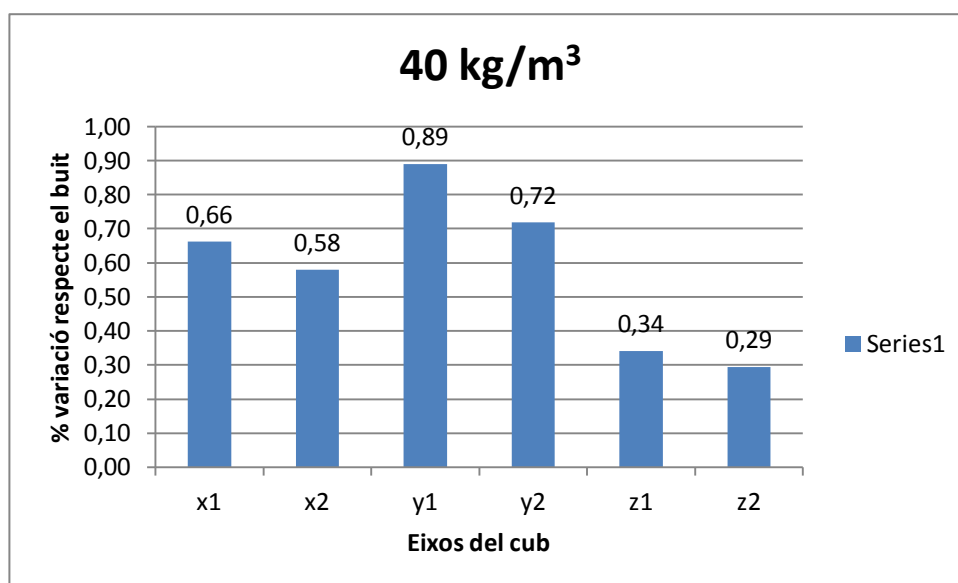
Finalment, cal destacar que en la gràfica en les cares X i les cares Z tenim una certa simetria. En canvi, en les cares Y hi ha una desigualtat notable: passem d'un 0,27 % de variació a un 0,36 %. Aquest fet pot ser degut al fet que tot i que se suposi uniformitat de les

⁷ Les mesures detallades per a cada cara es troben a l'annex F.

fibres dins de la proveta, realment en la cara Y1 i la Y2 no existeix tal fet ja sigui per orientacions diferents de les fibres com de la quantitat de fibres que recaigui en aquella cara.

4.2.2 Mesura de la proveta de 40 kg/m³

En la il·lustració 36 es pot observar la variació d'inductància mitja per a cada una de les cares de la proveta. En l'eix d'abscisses hi trobem cada una de les cares de la proveta i en l'eix d'ordenades el percentatge de variació respecte el buit. Tal i com s'observa i a diferència del cas de la proveta de 20 kg/m³, el percentatge de variació respecte el buit de cada una de les cares és diferent: oscil·la entre 0,29 % i 0,89 % respecte el valor nominal mesurat i si es tenen en compte les dues mesures per a cada cara, en aquest cas tenim que la orientació prioritària de les fibres segueix la cara Y⁸.



Il·lustració 36.- Gràfica del percentatge de variació d'inductància respecte el buit de cada una de les cares de la proveta de 40 kg/m³

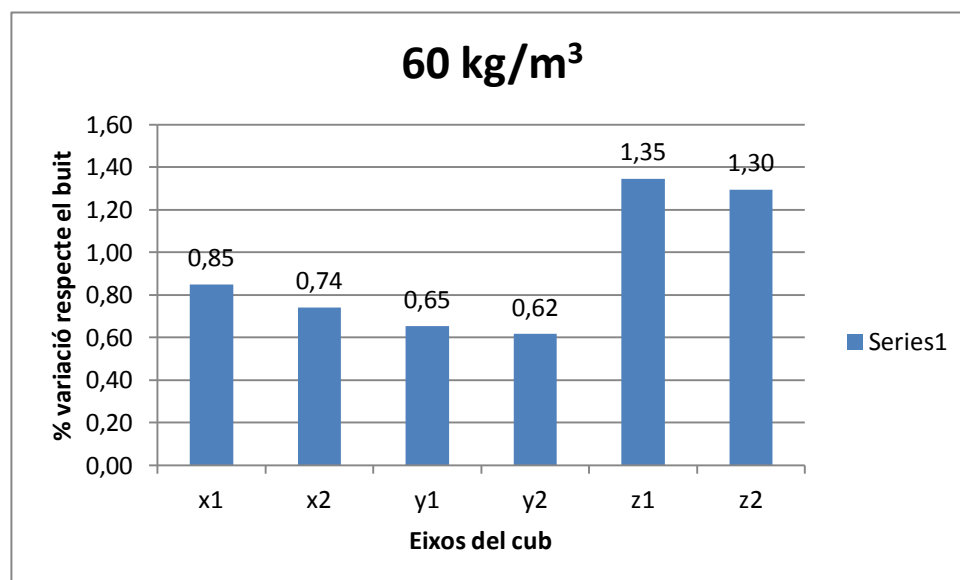
Finalment, de forma similar al cas de la proveta de 20 kg/m³, cal destacar que en la gràfica en les cares X i les cares Z tenim una certa simetria. En canvi, en les cares Y hi ha una desigualtat notable: passem d'un 0,89% de variació a un 0,72%. Aquest fet pot ser degut al

⁸ Les mesures detallades per a cada cara es troben a l'annex F.

fet que tot i que se suposi uniformitat de les fibres dins de la proveta, realment en la cara Y1 i la Y2 no existeix tal fet ja sigui per orientacions diferents de les fibres com de la quantitat de fibres que recaigui en aquella cara.

4.2.3 Mesura de la proveta de 60 kg/m³

En la il·lustració 37 es pot observar la variació d'inductància mitja per a cada una de les cares de la proveta. En l'eix d'abscisses hi trobem cada una de les cares de la proveta i en l'eix d'ordenades el percentatge de variació respecte el buit. Tal i com s'observa com en el cas de la proveta de 40 kg/m³, el percentatge de variació respecte el buit de cada una de les cares és diferent: oscil·la entre 0,62% i 1,35% respecte el valor nominal mesurat i si es tenen en compte les dues mesures per a cada cara, en aquest cas tenim que la orientació prioritària de les fibres segueix la cara Z⁹.



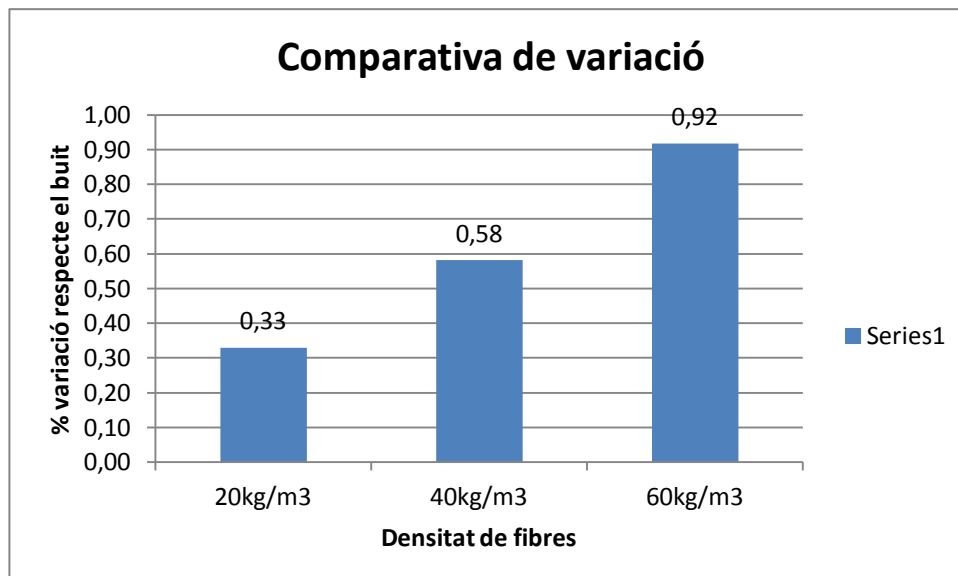
Il·lustració 37.- Gràfica del percentatge de variació d'inductància respecte el buit de cada una de les cares de la proveta de 60 kg/m³

Finalment, de forma similar al casos anteriors, cal destacar que en la gràfica en les cares Y i les cares Z tenim una certa simetria. En canvi, en les cares Y hi ha una desigualtat notable: passem d'un 0,85% de variació a un 0,74%.

⁹ Les mesures detallades per a cada cara es troben a l'annex F.

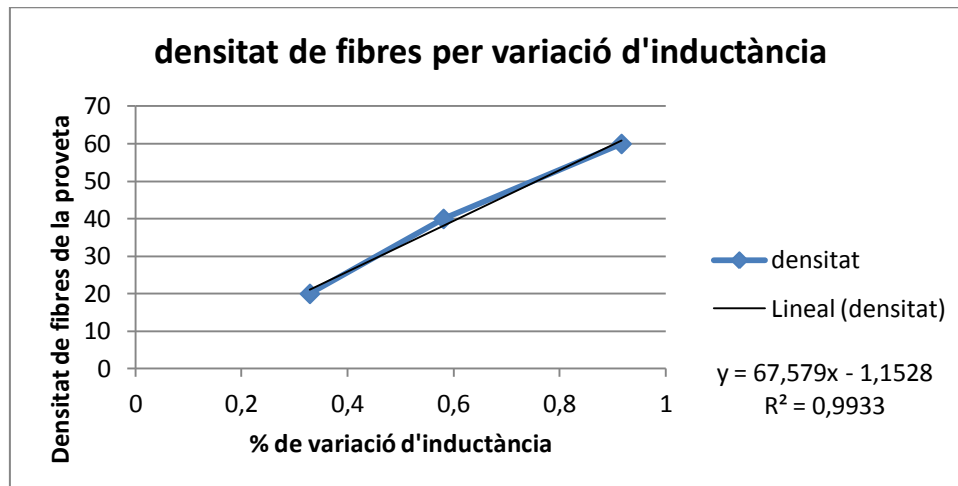
4.2.4 Comparativa i conclusions dels resultats de les tres provetes

Un cop realitzades totes les mesures en totes les provetes de formigó de diferents densitats es calcula la inductància mitjana de cada una de les provetes. Aquestes mitjanes s'han fet amb les mitjanes de cada una de les cares, obtenint com a resultat la gràfica de la il·lustració 38. En aquesta gràfica es pot observar un comportament linealment creixent amb la densitat de fibres de cada una de les provetes. Així doncs, segons aquests resultats, es pot comprovar que, com més densitat de fibres hi hagi en la mescla de formigó, més resposta inductiva tindrem i per tant, podrem detectar de forma més clara la presència d'aquestes fibres en la proveta.



Il·lustració 38.- Gràfica final comparativa del percentatge de variació de la inductància de la bobina respecte a una concentració determinada de fibres en el formigó

Finalment cal destacar que amb més provetes de formigó de densitats diferents a les usades es podria arribar a tenir una equació més fidedigna que relacionés el contingut de fibres amb la variació d'inductància mesurada. En el nostre cas però, amb 3 mesures, tal i com es veu en la il·lustració 39, l'equació resultant és $y = 67,579x - 1,1528$ on l'eix d'abscisses ens diu la variació d'inductància respecte el buit i l'eix d'ordenades la concentració de fibres de la proveta.



Il·lustració 39.- Aproximació lineal de la densitat de fibres respecte a un percentatge de variació d'inductància determinat

4.3 Detecció de diferents tipus de fibres

En aquest apartat s'ha fet una prova per comprovar si la bobina és capaç de detectar fibres de materials que no siguin estrictament ferromagnètics. Per aquesta prova, s'han utilitzat unes lloses de formigó reforçades amb fibres d'acer de 3 tipus diferents: acer d'alta resistència, acer inoxidable i acer convencional al carboni. Per a la realització de la prova el primer pas consisteix en dividir la llosa en 18 parts tal i com mostra la il·lustració 40. Cal destacar que cada divisió és un quadrat de costat igual al diàmetre de la bobina, de tal manera que després de passar per totes les parts, la bobina haurà fet les mesures en tota la superfície de la llosa. A continuació es procedeix a la mesura que consisteix en col·locar la bobina a sobre de cada una de les divisions i mesurar-ne la inductància total amb l'analitzador d'impedàncies HP4192A de què es disposa al laboratori. Finalment es comprova la diferència d'inductància de cada una de les zones amb la inductància de la bobina mesurada sense cap element pertorbador.

1	2	3	4	5	6
7	8	9	10	11	12
13	14	15	16	17	18

Il·lustració 40.- Divisió de les zones de mesura sobre la llosa de formigó

L'objectiu d'aquestes proves consisteix en saber diferenciar els tipus de fibres utilitzades, veure el comportament de la inductància de la bobina amb aquestes fibres i finalment si és possible caracteritzar la disposició de les fibres en les lloses seleccionades.

4.3.1 Llosa de formigó amb fibres d'acer convencional al carboni

La llosa disponible en el laboratori per a la realització d'aquesta prova conté fibres d'acer convencional al carboni. Aquestes fibres tenen una longitud de 30 mm i un diàmetre de 0,3 mm. Cal destacar també que la llosa disponible conté una dosificació de 30 kg/m³ de fibres en el seu interior.

Tal i com es pot observar en la il·lustració 41, les mesures en les diferents zones de la llosa no disten molt de la mesura en el buit. Tot i així, cal destacar que en les posicions centrals de la llosa, és a dir, les posicions 8, 9, 10 i 11, obtenim el màxim d'inductància. Suposant que la distribució de fibres dins la llosa sigui uniforme, això pot ser degut a la contribució de la resta de fibres del voltant, essent el centre de la llosa el punt que rep més contribucions de les fibres properes.

Posició	Valor inductància (mH)	Relació amb buit (%)	Posició	Valor inductància (%)	Relació amb buit (%)
Buit	215	0	Buit	215	0
1	215,3	0,140	10	215,8	0,372
2	215,2	0,093	11	215,7	0,326
3	215,3	0,140	12	215,6	0,279
4	215,4	0,186	13	215,5	0,233
5	215,6	0,279	14	215,5	0,233
6	215,4	0,186	15	215,3	0,140
7	215,3	0,140	16	215,6	0,279
8	215,7	0,326	17	215,4	0,186
9	215,6	0,279	18	215,4	0,186

Il·lustració 41.- Taula de resultats de les mesures d'inductància en la llosa que conté fibra d'acer convencional al carboni

Finalment, per tal de situar els resultats de forma més gràfica, es presenta a continuació, en la il·lustració 42, la inductància obtinguda en cada una de les posicions de la llosa. Així doncs, tal i com s'ha comentat, es pot observar que els valors sensiblement més elevats es troben situats en el centre de la llosa.

215,3	215,2	215,3	215,4	215,6	215,4
215,3	215,7	215,6	215,8	215,7	215,6
215,5	215,5	215,3	215,6	215,4	215,4

Il·lustració 42.- Representació de les mesures d'inductància en la llosa de formigó

4.3.2 Llosa de formigó amb fibres d'acer d'alta resistència mecànica

La llosa disponible en el laboratori per a la realització d'aquesta prova conté fibres d'acer d'alta resistència mecànica (superior a 2000 MPa). Aquestes fibres, també conegudes com a fibres assassines pel fet que els operaris, malgrat els guants protectors, es punxen amb elles, tenen una longitud de 13 mm i un diàmetre de 0,12 mm. Cal destacar també que la llosa disponible conté una dosificació de 160 kg/m³ de fibres en el seu interior.

Tal i com es pot observar en la il·lustració 43, les mesures en les diferents zones de la llosa, en aquest cas, a diferència del cas anterior disten de forma significativa de la mesura en el buit. En aquest cas, cal destacar que en les posicions centrals de la llosa, és a dir, les posicions 9, 10 i 11, obtenim el màxim d'inductància superior en un 5,5% al valor del buit. Suposant que la distribució de fibres dins la llosa sigui uniforme, això pot ser degut a la contribució de la resta de fibres del voltant, essent el centre de la llosa el punt que rep més contribucions de les fibres properes.

Posició	Valor inductància (mH)	Relació amb buit (%)	Posició	Valor inductància (mH)	Relació amb buit (%)
Buit	215	0	Buit	215	0
1	226,2	5,209	10	227,3	5,721
2	225,9	5,070	11	226,9	5,535
3	225,3	4,791	12	224,3	4,326
4	225,8	5,023	13	226,2	5,209
5	226,4	5,302	14	224,8	4,558
6	224,2	4,279	15	226,2	5,209
7	226	5,116	16	225,6	4,930
8	226	5,116	17	226	5,116
9	227,3	5,721	18	224,5	4,419

Il·lustració 43.- Taula de resultats de les mesures d'inductància en la llosa que conté fibra d'acer d'alta resistència mecànica.

Finalment, com en el cas anterior, per tal de situar els resultats de forma més gràfica, es presenta a continuació, en la il·lustració 44, la inductància obtinguda en cada una de les posicions de la llosa. En aquest cas, també són destacables els valors d'inductància obtinguts en l'extrem esquerre de la llosa, els quals per a les 3 mesures de la zona han donat valors sensiblement més elevats que la resta de valors de la llosa exceptuant els 3 valors més elevats del centre i el del punt 5. Això segurament sigui un indicador que en aquella zona hi hagi més concentració de fibres.

226,2	225,9	225,3	225,8	226,4	224,2
226	226	227,3	227,3	226,9	224,3
226,2	224,8	226,2	225,6	226	224,5

Il·lustració 44.- Representació de les mesures d'inductància en la llosa de formigó

4.3.3 Llosa de formigó amb fibres d'acer inoxidable

La llosa disponible en el laboratori per a la realització d'aquesta prova conté fibres d'acer inoxidable conformades en els extrems. Aquestes fibres tenen una longitud de 25 mm i un diàmetre de 0,2 mm. Cal destacar també que la llosa disponible conté una dosificació de 50 kg/m³ de fibres en el seu interior.

Tal i com es pot observar en la il·lustració 45, les mesures en les diferents zones de la llosa, igual que en el cas de l'acer al carboni, no disten de forma significativa de la mesura en el buit. En aquest cas, cal destacar que el màxim d'inductància mesurada es troba exactament en la primera posició, cosa que ens indica que allà hi tindrem una major concentració de fibres amb major probabilitat. Com en els dos casos anteriors, veiem que en el centre de la llosa, en els punts 8 i 10, tornen a haver una màxims relatius d'inductància, segurament conseqüència del fet explicat en els apartats anteriors.

	Valor inductància (mH)	Relació amb buit (%)	Posició	Valor inductància (mH)	Relació amb buit (%)
Buit	215	0	Buit	215	0
1	215,9	0,419	10	215,8	0,372
2	215,6	0,279	11	215,6	0,279
3	215,6	0,279	12	215,5	0,233
4	215,6	0,279	13	215,6	0,279
5	215,5	0,233	14	215,6	0,279
6	215,4	0,186	15	215,5	0,233
7	215,7	0,326	16	215,6	0,279
8	215,8	0,372	17	215,6	0,279
9	215,6	0,279	18	215,5	0,233

Il·lustració 45.- Taula de resultats de les mesures d'inductància en la llosa que conté fibra d'acer d'alta resistència mecànica.

Finalment, com en els casos anteriors, per tal de situar els resultats de forma més gràfica, es presenta a continuació, en la il·lustració 46, la inductància obtinguda en cada una de les posicions de la llosa.

215,9	215,6	216,6	215,6	215,5	215,4
215,7	215,8	215,6	215,8	215,6	215,5
216,6	215,6	215,5	215,6	215,6	215,5

Il·lustració 46.- Representació de les mesures d'inductància en la llosa de formigó

5 Conclusions

5.1 Conclusions

Un cop finalitzat el projecte i amb totes les mesures realitzades per tal de comprovar la viabilitat del nostre disseny es poden extreure les següents conclusions.

La bobina dissenyada permet la detecció de fibres en tot tipus de provetes. L'estructura de la bobina a més permet aconseguir una major sensibilitat degut als efectes de la inductància mútua que fan augmentar el valor de la inductància total.

Per solucionar la baixa sensibilitat inicial del sistema, s'ha fet ús de freqüències pròximes a la freqüència de ressonància, l'ús de les quals ha permès augmentar de forma considerable la sensibilitat del sistema malgrat perdre estabilitat degut als efectes paràsits que això comporta. Per simplificar aquests efectes paràsits i treballar a les freqüències òptimes de l'analitzador d'impedàncies s'ha acabat posant un condensador en paral·lel a la bobina rebaixant així la freqüència de ressonància.

En quant al funcionament del sistema en sí, cal dir que aquest pot detectar acumulacions de fibres amb mesures superficials fins a una profunditat de 15 mm.

Tot i que el disseny de la bobina no està pensat específicament per a la determinació de l'orientació de les fibres, mitjançant mesures en totes les cares de la proveta i fent una estimació mitjana de la inductància mesurada en cada cara, es pot determinar en quines cares i per tant, en quins eixos, les fibres estan més concentrades. D'aquesta manera es pot arribar a estimar quina és la orientació mitjana de les fibres.

El sistema és capaç de mesurar provetes amb tot tipus de concentracions de fibres a partir de 20 kg/m^3 amb una diferència d'inductància mitjana del 0,33% respecte aquest valor en el buit. Com més concentració de fibres hi hagi en la proveta, més sensibilitat i per tant més variació respecte el buit hi haurà.

Finalment, tal i com es suposava en la teoria, segons el tipus d'acer o material de què estiguin compostes les fibres, més variació d'impedància es registrarà degut al seu coeficient de permeabilitat magnètica i el coeficient de conductivitat elèctrica.

5.2 Línies futures

Una de les línies futures pot ser el disseny d'una bobina concèntrica amb el nucli de ferrita tal i com es pot veure en la il·lustració 47, de tal manera que s'aconsegueixi centrar el camp magnètic generat per la bobina en un material purament ferromagnètic com és la ferrita. D'aquesta manera, la inductància de la bobina seria més elevada i per tant, s'aconseguiria més sensibilitat, cosa que provocaria una major profunditat de detecció de les fibres.



Il·lustració 47.- Nuclis de ferrita

Un altre punt interessant a estudiar seria el de mirar de disminuir els efectes paràsits que es creen al voltant de la freqüència de ressonància. Tot i que en aquest treball s'ha provat un condensador ceràmic, encara hi ha hagut incerteses inevitables en la mesura. Un bon punt de partida seria utilitzar un altre tipus de condensador que no fós tant sensible a la temperatura de treball.

El fet de mesurar amb la bobina tombada seria interessant utilitzar-lo amb una carrera del bobinat que fós més petita, per tal que qualsevol fibra fós més llarga que la carrera de la bobina i d'aquesta manera, s'aprofitaria la major sensibilitat que aquesta disposició provoca.

Finalment, un altre punt interessant de cara a la possible comercialització del prototip seria provar de fer aquestes bobines concèntriques amb bobines planes, de tal manera que es reduïssin les dimensions del sistema de mesura. De fet, es podria aprofitar l'estructura del sensor LDC1000 EVM substituint la bobina plana que porta incorporada per les dues bobines concèntriques planes o les bobines concèntriques dissenyades en aquest projecte. D'aquesta manera es podria aprofitar el software integrat en aquell sensor per a un processament del senyal més senzill i transportable.

6 Apèndix

A. Simulacions del camp magnètic

En aquest apartat de l'annex es troben situades totes les simulacions fetes amb el programa de simulacions per elements finits FEMM 4.2. Les simulacions obtingudes fan referència a l'anàlisi del camp magnètic generat per la bobina gran, la bobina petita i finalment la bobina concèntrica en tot tipus de situacions.

Primerament es presentarà l'anàlisi del camp magnètic de la bobina concèntrica amb els dos sentits del bobinat amb la presència d'un cilindre d'acer a diferents distàncies. Finalment es presentarà la relació del màxim de camp magnètic de la bobina i el màxim de camp magnètic mesurat en un material ferromagnètic a diferents distàncies de la bobina concèntrica.

Camp magnètic (T)					
Distància (mm)	sense acer	Acer a 0mm	Acer a 2.5mm	Acer a 5mm	Acer a 7.5mm
0	0,026373	0,154083	0,036728	0,032633	0,030193
2,5	0,018757	0,002489	0,033174	0,027312	0,024217
5	0,014849	0,002435	0,002187	0,025800	0,021455
7,5	0,011622	0,002326	0,002135	0,001888	0,020513
10	0,009346	0,002196	0,002041	0,001844	0,001612
12,5	0,007551	0,002031	0,001923	0,001762	0,001577
15	0,006160	0,001847	0,001780	0,001658	0,001503
17,5	0,005069	0,001666	0,001626	0,001531	0,001410
20	0,004188	0,001488	0,001448	0,001385	0,001299
22,5	0,003400	0,001303	0,001286	0,001235	0,001171

Figura A.1.- Taula de resultats de la simulació del camp magnètic resultant de la bobina concèntrica amb el mateix sentit de gir per ambdues bobines amb la presència d'un cilindre d'acer a diferents distàncies. En color vermell es destaca la posició de l'acer i es pot observar que just a la següent distància després de la presència de l'acer el valor del camp magnètic decau un ordre de magnitud.

Camp magnètic (T)						
Distància (mm)	Acer a 10mm	Acer a 12.5mm	Acer a 15mm	Acer a 17.5mm	Acer a 20mm	Acer a 22.5mm
0	0,028872	0,027942	0,027450	0,027005	0,026779	0,026630
2,5	0,022370	0,021166	0,020527	0,019859	0,019572	0,019394
5	0,018922	0,017293	0,016532	0,015736	0,015352	0,015120
7,5	0,017064	0,015125	0,013899	0,013012	0,012620	0,012244
10	0,016518	0,013907	0,012200	0,011285	0,010525	0,010108
12,5	0,001365	0,013459	0,011301	0,010033	0,009108	0,008589
15	0,001327	0,001136	0,010992	0,009320	0,008205	0,007498
17,5	0,001264	0,001106	0,000936	0,009041	0,007652	0,006790
20	0,001184	0,001053	0,000910	0,000756	0,007449	0,006311
22,5	0,001090	0,000979	0,000861	0,000732	0,000598	0,006137

Figura A.2.- Taula de resultats de la simulació del camp magnètic resultant de la bobina concèntrica amb el mateix sentit de gir per ambdues bobines amb la presència d'un cilindre d'acer a diferents distàncies. En color vermell es destaca la posició de l'acer i es pot observar que just a la següent distància després de la presència de l'acer el valor del camp magnètic decau un ordre de magnitud.

Camp magnètic (T)					
Distància (mm)	sense acer	Acer a 0mm	Acer a 2.5mm	Acer a 5mm	Acer a 7.5mm
0	0,006430	0,02668	0,004347	0,005591	0,005968
2,5	0,003226	0,001836	0,003515	0,005367	0,005465
5	0,002640	0,001801	0,001602	0,005838	0,006212
7,5	0,002642	0,001722	0,001567	0,001372	0,006574
10	0,002520	0,001627	0,001499	0,001342	0,001162
12,5	0,002227	0,001506	0,001413	0,001283	0,001137
15	0,000187	0,001369	0,001309	0,001208	0,001085
17,5	0,001514	0,001236	0,001196	0,001116	0,001018
20	0,001175	0,001104	0,001066	0,00101	0,000938
22,5	0,000855	0,000967	0,000946	0,000901	0,000846

Figura A.3.- Taula de resultats de la simulació del camp magnètic resultant de la bobina concèntrica amb diferent sentit de gir per ambdues bobines amb la presència d'un cilindre d'acer a diferents distàncies. En color vermell es destaca la posició de l'acer i es pot observar que just a la següent distància després de la presència de l'acer el valor del camp magnètic decau un ordre de magnitud.

Camp magnètic (T)						
Distància (mm)	Acer a 10mm	Acer a 12.5mm	Acer a 15mm	Acer a 17.5mm	Acer a 20mm	Acer a 22.5mm
0	0,005957	0,005909	0,005966	0,005856	0,005851	0,005846
2,5	0,005182	0,004885	0,004541	0,004276	0,004112	0,004001
5	0,005849	0,00533	0,004849	0,004545	0,004306	0,004137
7,5	0,006337	0,005712	0,005191	0,004807	0,004517	0,004337
10	0,006456	0,005919	0,005349	0,004854	0,004488	0,004256
12,5	0,000975	0,005971	0,005346	0,004791	0,004361	0,004063
15	0,000949	0,000806	0,005338	0,004721	0,004217	0,003849
17,5	0,000904	0,000785	0,000659	0,004689	0,004104	0,003669
20	0,000847	0,000748	0,000641	0,000529	0,004061	0,003532
22,5	0,00078	0,000695	0,000607	0,000513	0,000416	0,003481

Figura A.4.- Taula de resultats de la simulació del camp magnètic resultant de la bobina concèntrica amb el mateix sentit de gir per ambdues bobines amb la presència d'un cilindre d'acer a diferents distàncies. En color vermell es destaca la posició de l'acer i es pot observar que just a la següent distància després de la presència de l'acer el valor del camp magnètic decau un ordre de magnitud.

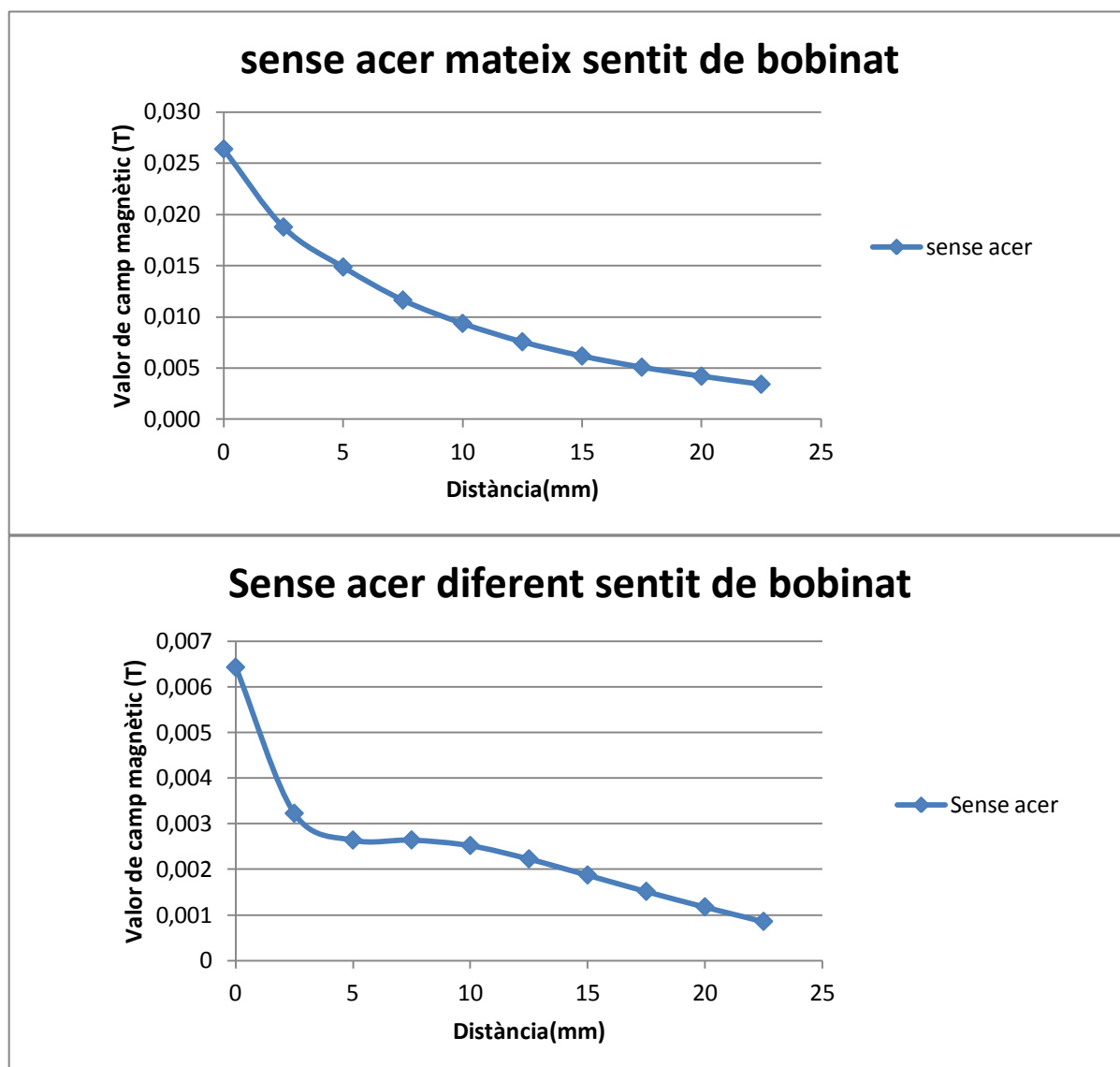


Figura A.5.- Gràfiques comparatives del camp magnètic resultant en el cas sense acer per als dos sentits de bobinat. S'observa que en el cas de mateix sentit el camp magnètic és superior al del cas de sentit oposat.

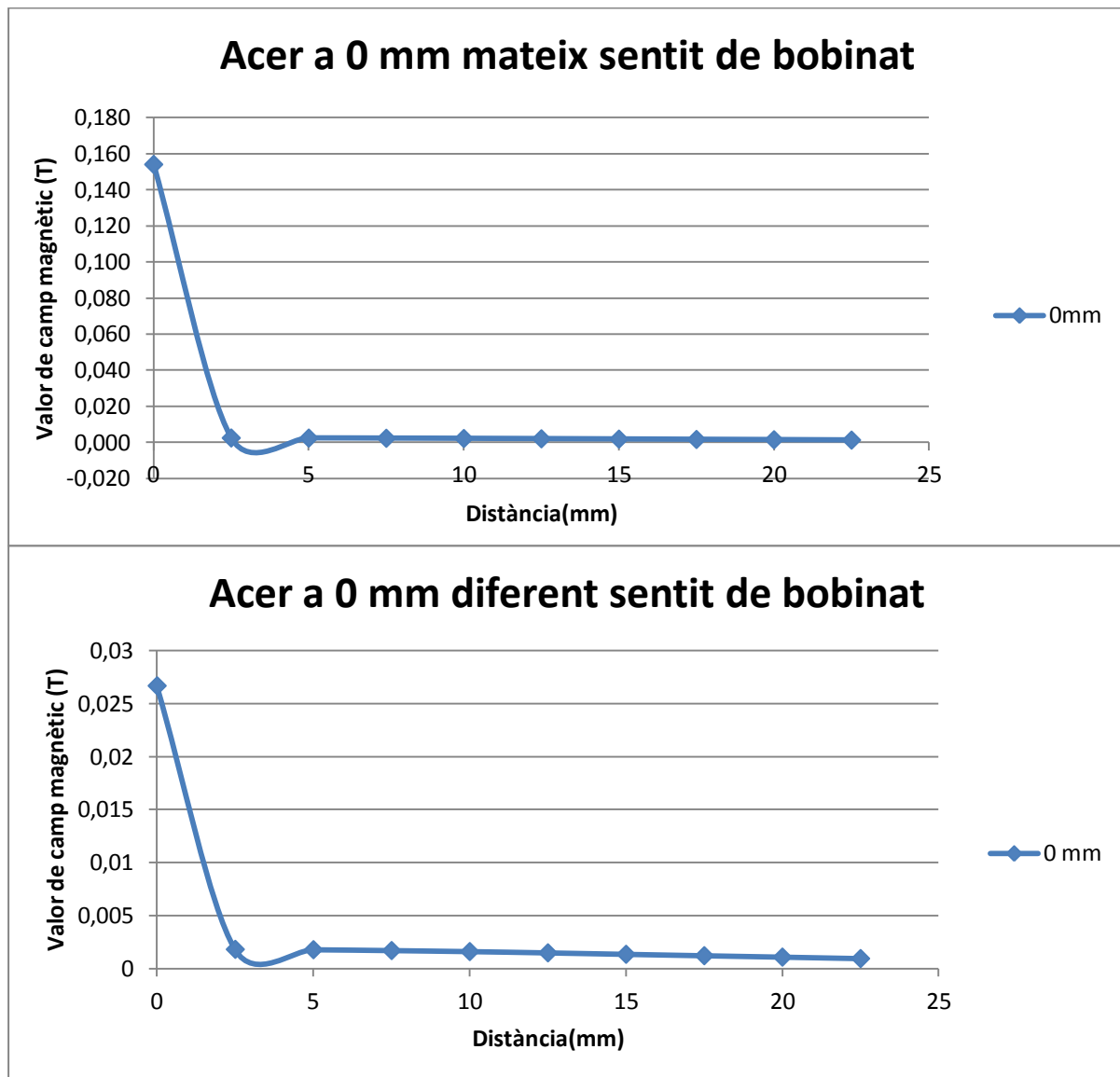


Figura A.6.- Gràfiques comparatives del camp magnètic resultant en el cas de tenir l'acer a 0 mm per als dos sentits de bobinat. S'observa que en el cas de mateix sentit el camp magnètic és superior al del cas de sentit oposat i en els dos casos es produeix un salt just després de la presència de l'acer.

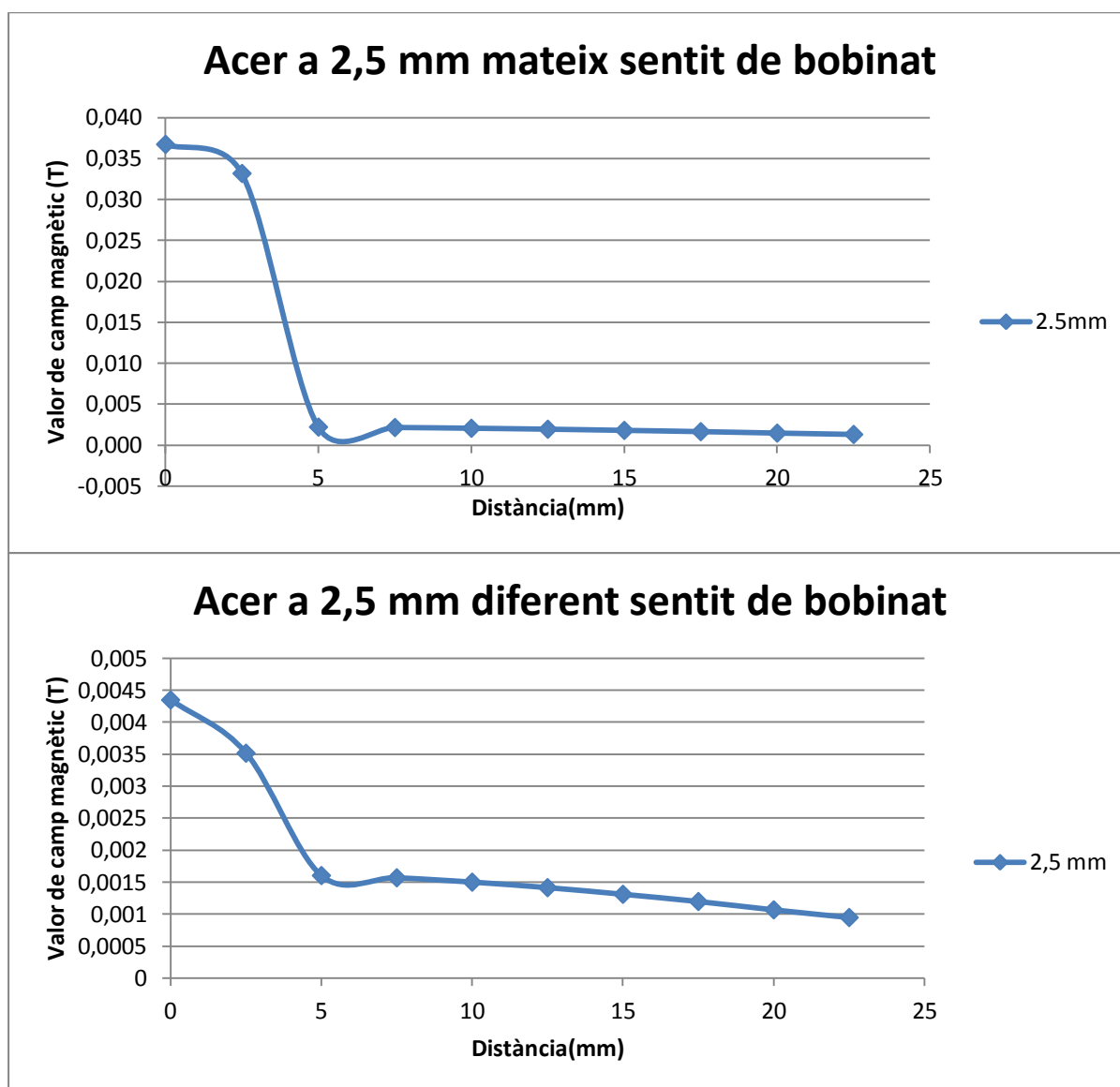


Figura A.7.- Gràfiques comparatives del camp magnètic resultant en el cas de tenir l'acer a 2,5 mm per als dos sentits de bobinat. S'observa que en el cas de mateix sentit el camp magnètic és superior al del cas de sentit oposat i en els dos casos es produeix un salt just després de la presència de l'acer.

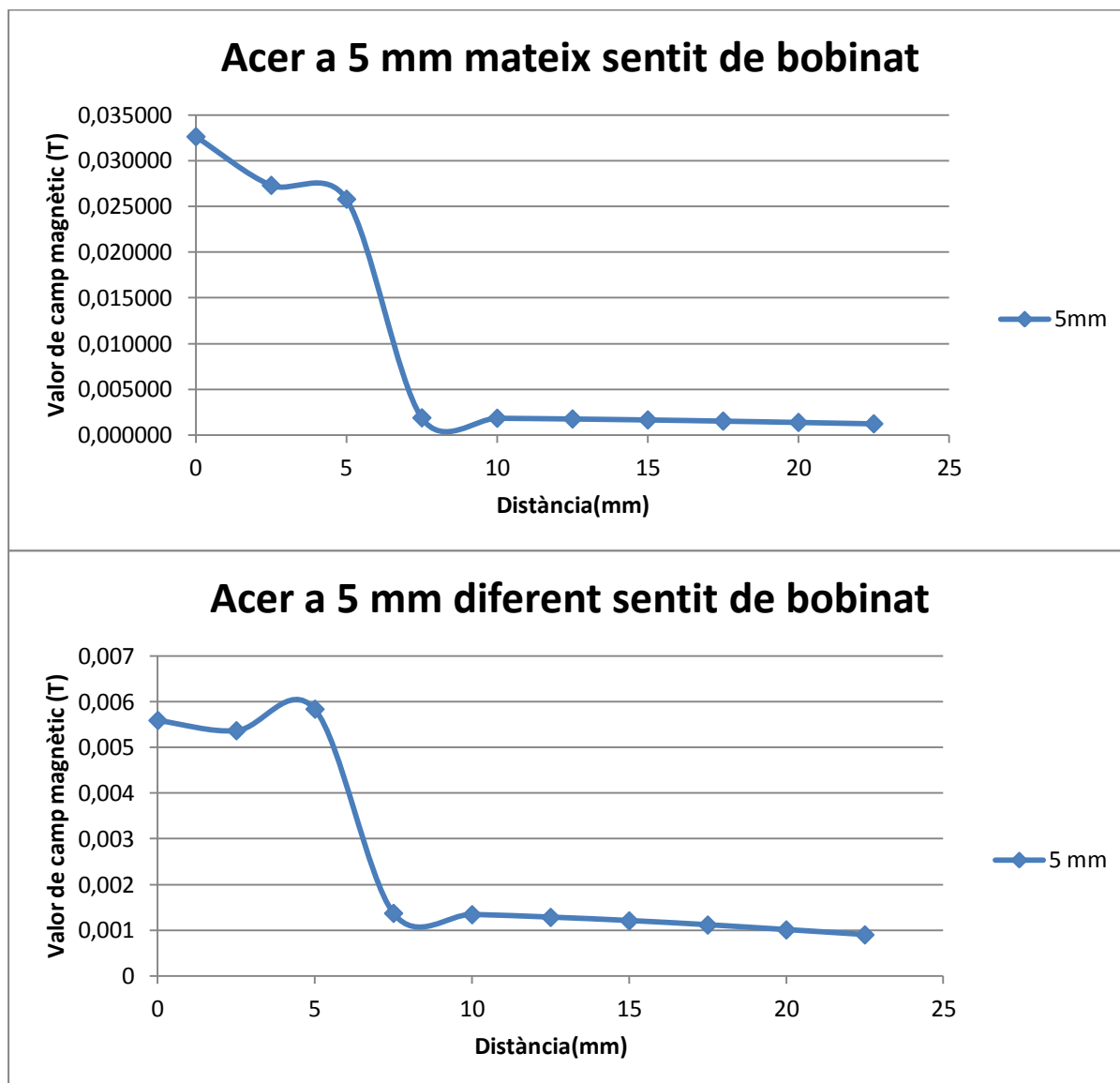


Figura A.8.- Gràfiques comparatives del camp magnètic resultant en el cas de tenir l'acer a 5 mm per als dos sentits de bobinat. S'observa que en el cas de mateix sentit el camp magnètic és superior al del cas de sentit oposat i en els dos casos es produeix un salt just després de la presència de l'acer.

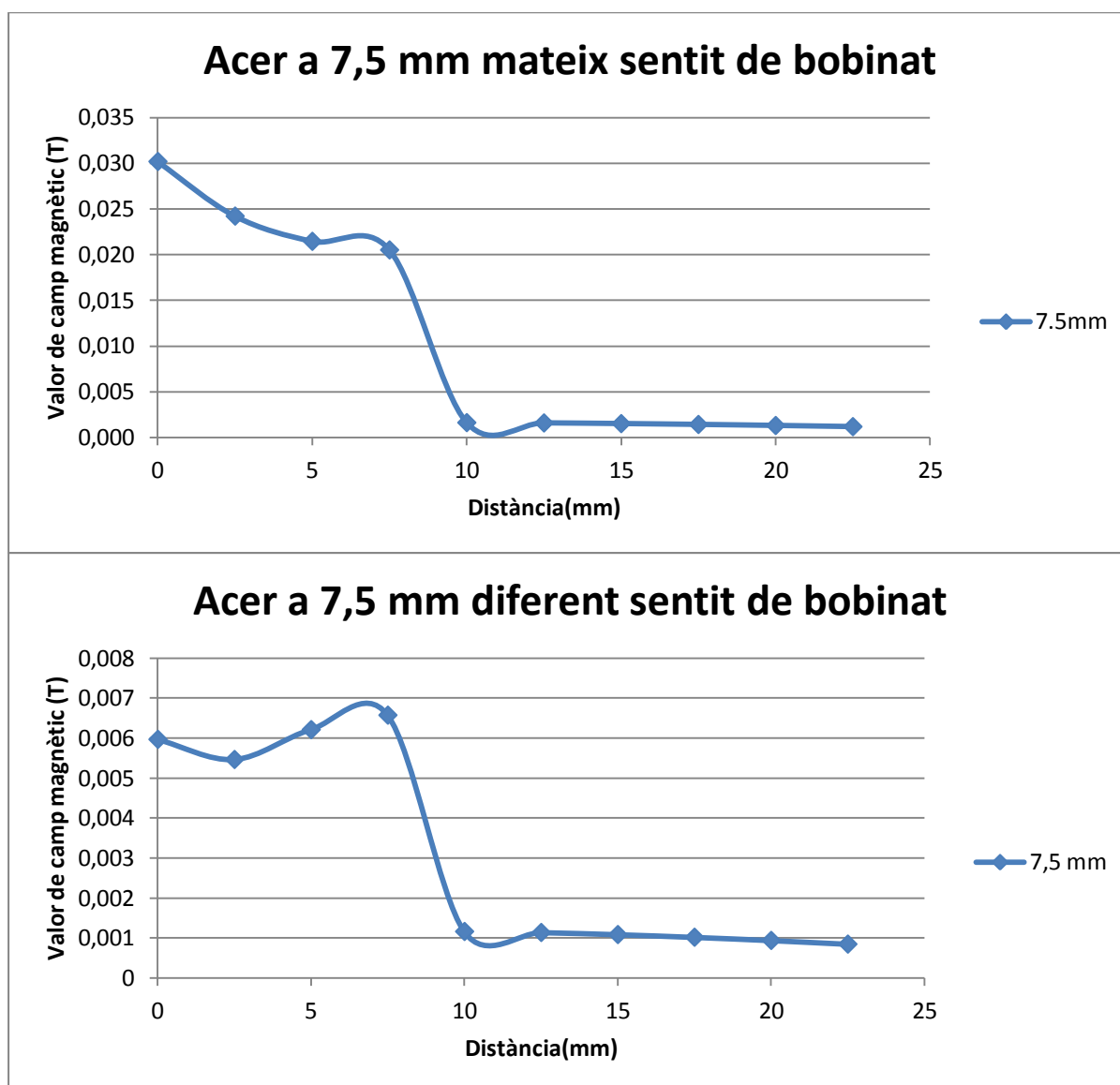


Figura A.9.- Gràfiques comparatives del camp magnètic resultant en el cas de tenir l'acer a 7,5 mm per als dos sentits de bobinat. S'observa que en el cas de mateix sentit el camp magnètic és superior al del cas de sentit oposat i en els dos casos es produeix un salt just després de la presència de l'acer.

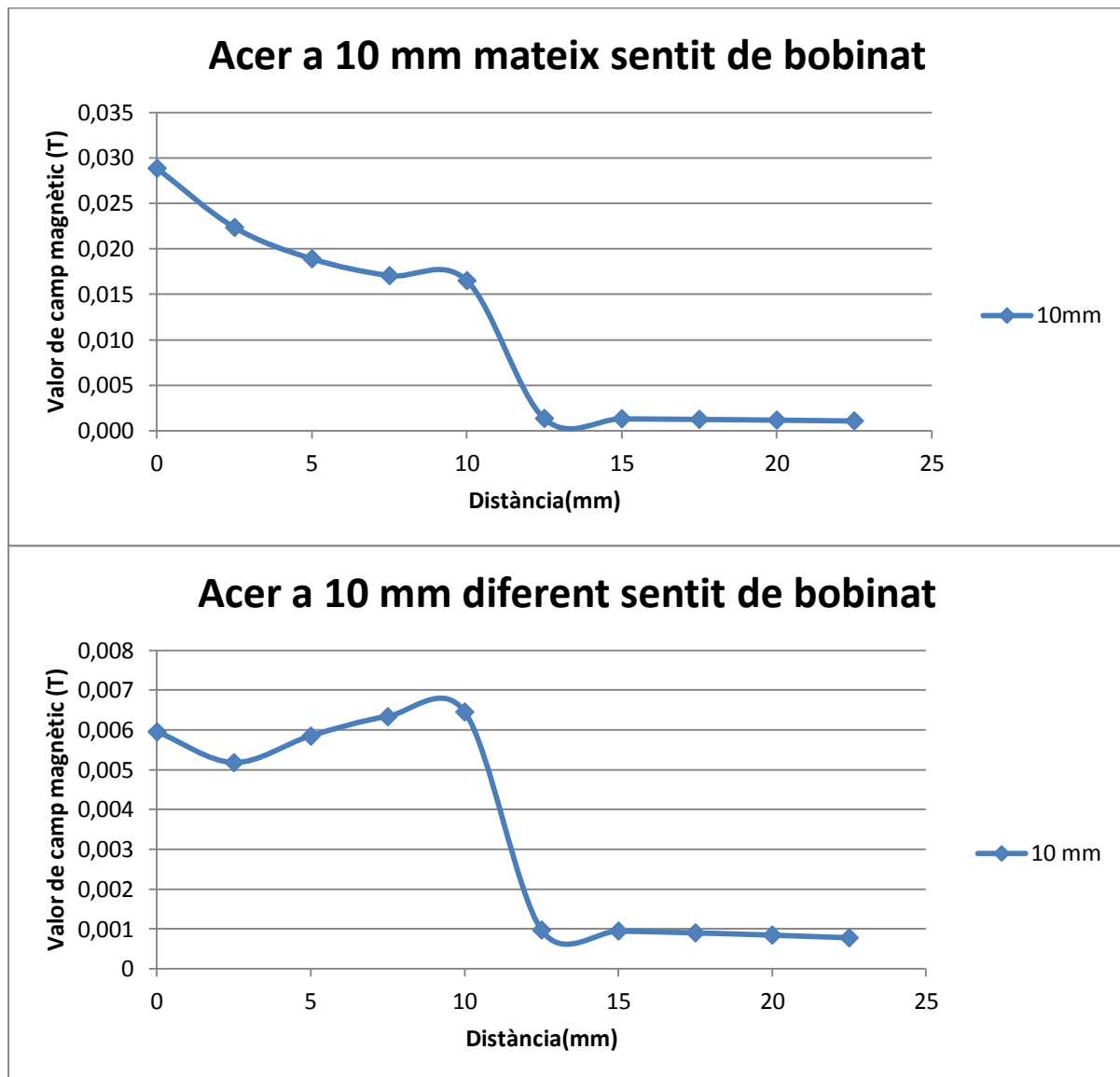


Figura A.10.- Gràfiques comparatives del camp magnètic resultant en el cas de tenir l'acer a 10 mm per als dos sentits de bobinat. S'observa que en el cas de mateix sentit el camp magnètic és superior al del cas de sentit oposat i en els dos casos es produeix un salt just després de la presència de l'acer.

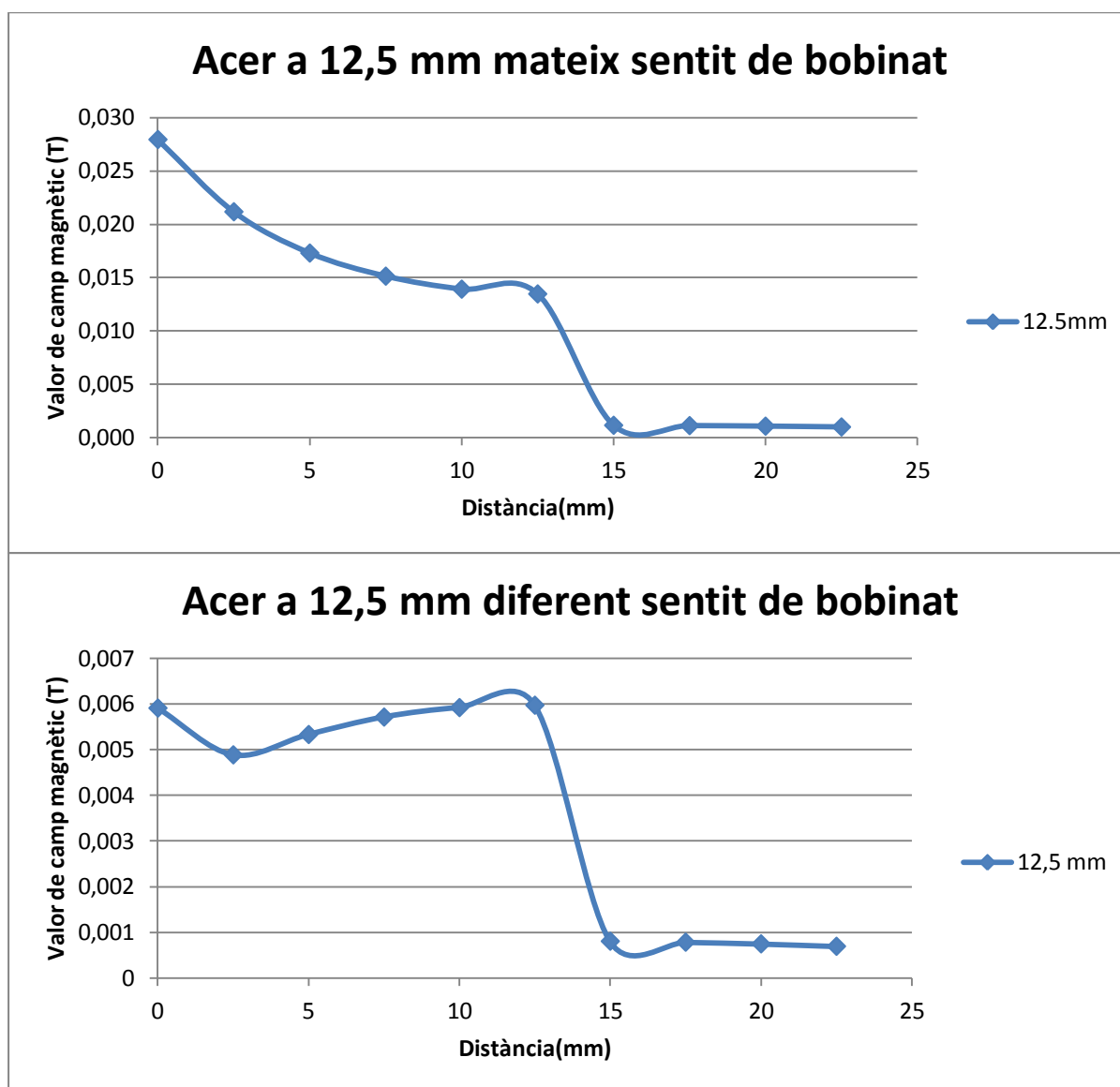


Figura A.11.- Gràfiques comparatives del camp magnètic resultant en el cas de tenir l'acer a 12,5 mm per als dos sentits de bobinat. S'observa que en el cas de mateix sentit el camp magnètic és superior al del cas de sentit oposat i en els dos casos es produeix un salt just després de la presència de l'acer.

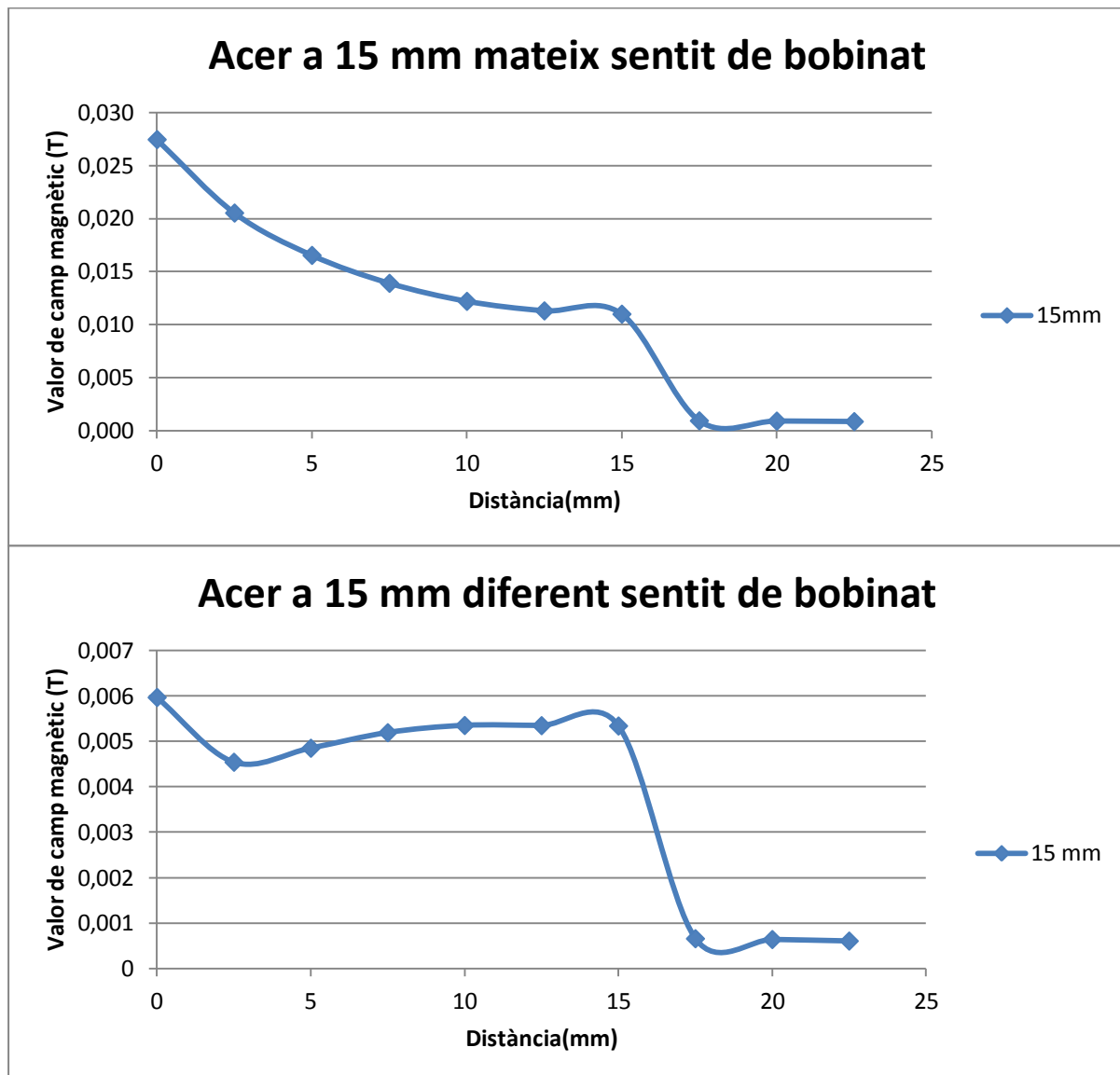


Figura A.12.- Gràfiques comparatives del camp magnètic resultant en el cas de tenir l'acer a 15 mm per als dos sentits de bobinat. S'observa que en el cas de mateix sentit el camp magnètic és superior al del cas de sentit oposat i en els dos casos es produeix un salt just després de la presència de l'acer.

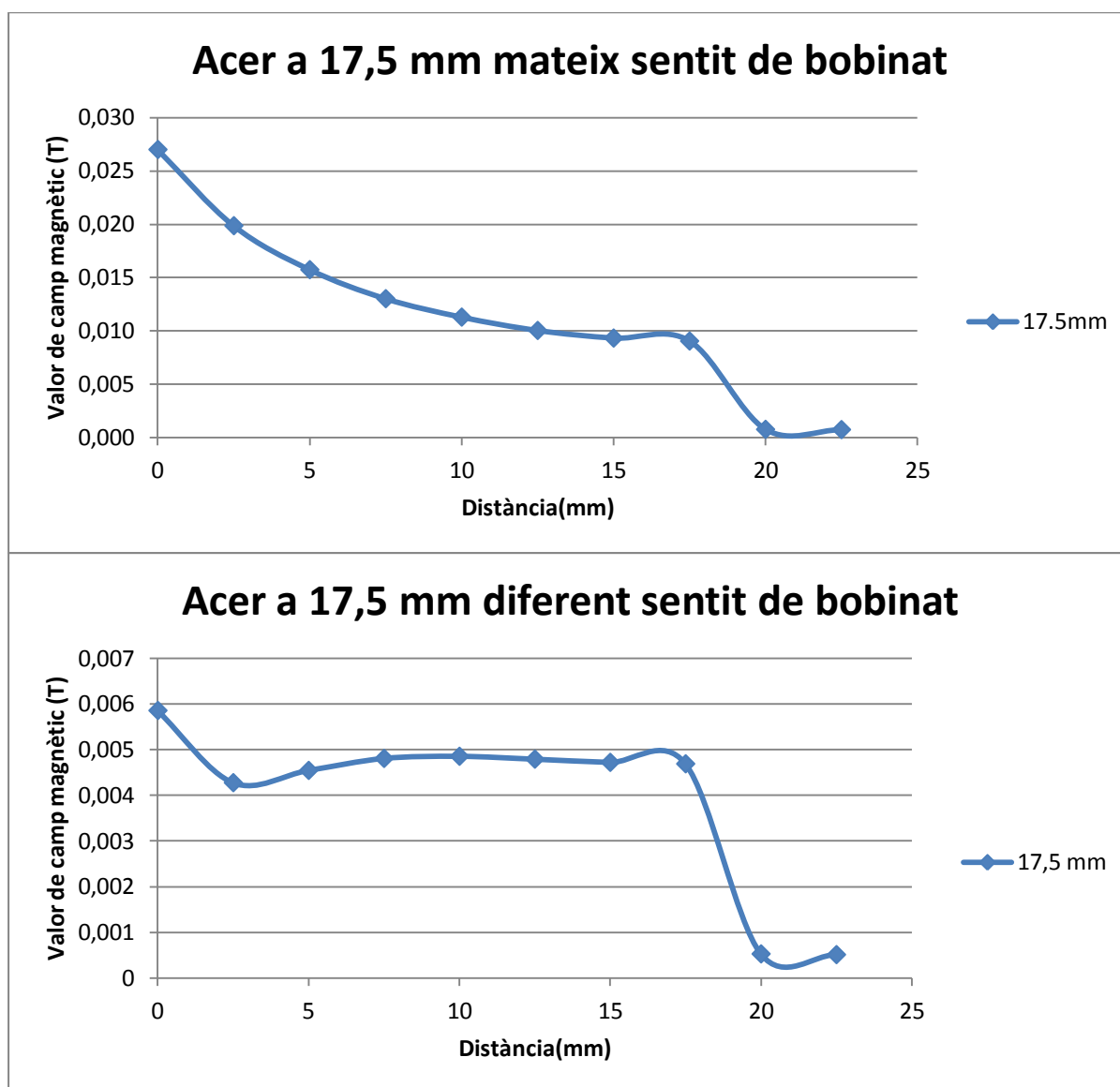


Figura A.13.- Gràfiques comparatives del camp magnètic resultant en el cas de tenir l'acer a 17,5 mm per als dos sentits de bobinat. S'observa que en el cas de mateix sentit el camp magnètic és superior al del cas de sentit oposat i en els dos casos es produeix un salt just després de la presència de l'acer.

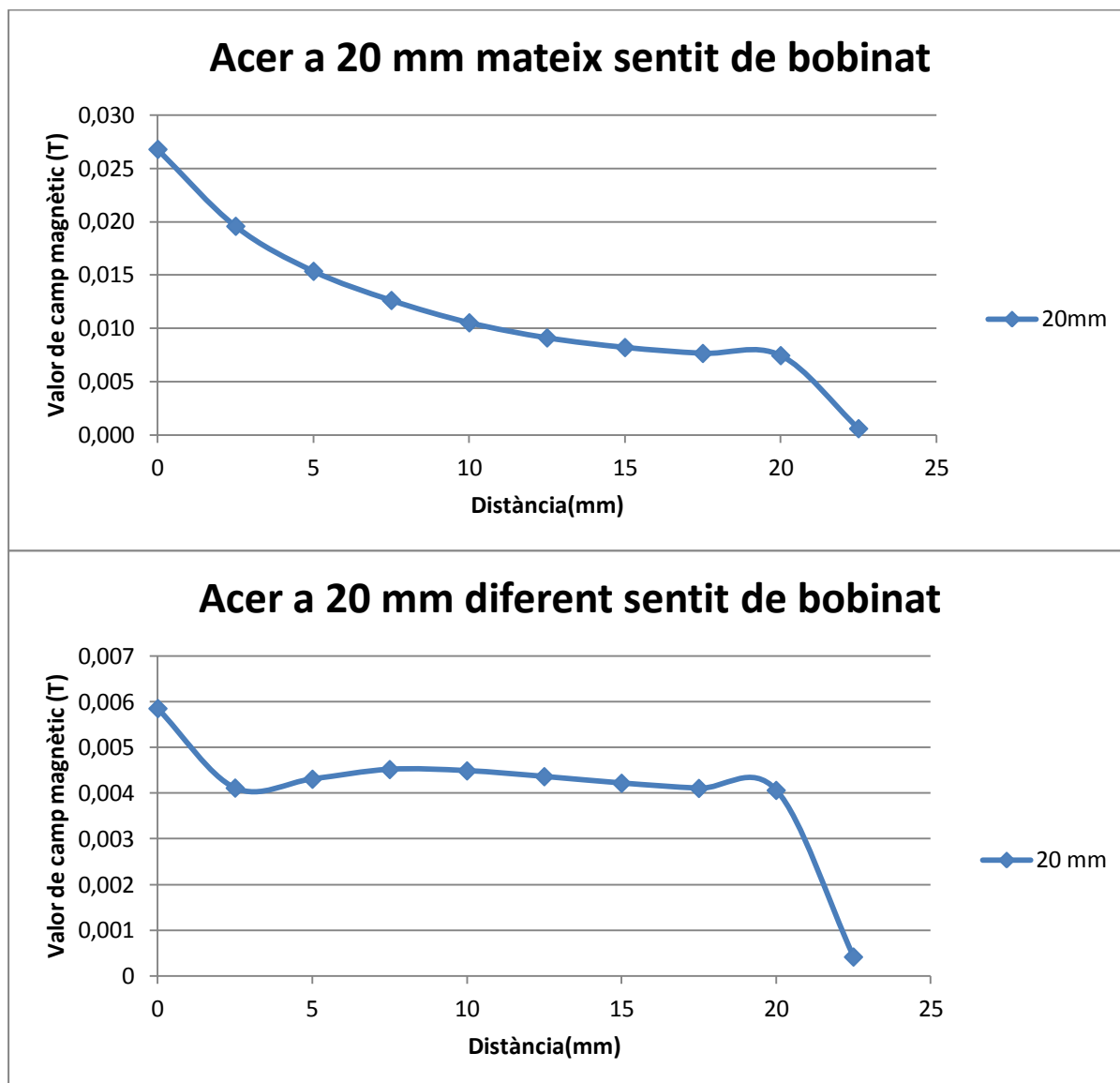


Figura A.14.- Gràfiques comparatives del camp magnètic resultant en el cas de tenir l'acer a 20 mm per als dos sentits de bobinat. S'observa que en el cas de mateix sentit el camp magnètic és superior al del cas de sentit oposat i en els dos casos es produeix un salt just després de la presència de l'acer.

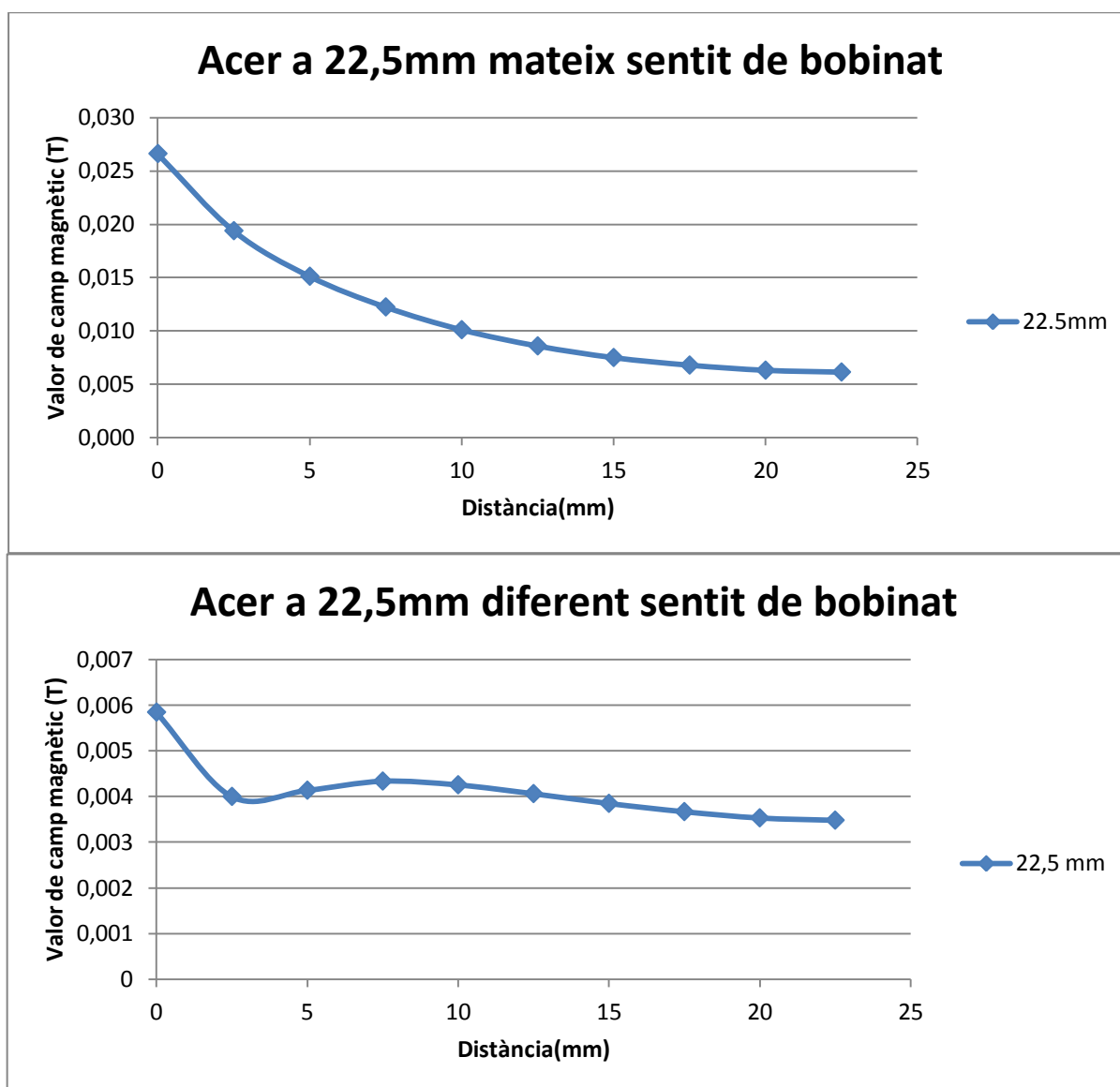


Figura A.15.- Gràfiques comparatives del camp magnètic resultant en el cas de tenir l'acer a 22,5 mm per als dos sentits de bobinat. S'observa que en el cas de mateix sentit el camp magnètic és superior al del cas de sentit oposat i en els dos casos es produeix un salt just després de la presència de l'acer.

1.- Simulació amb FEMM 4.2 en el cas de tenir l'acer a 2,5mm:

- Valor en punt maxím bobina: 0,0455T
- Valor en punt maxím acer: 0,1871



Figura A.16.- Simulació del camp magnètic amb l'acer a 2,5 mm amb el programa FEMM 4.2

- Zoom:

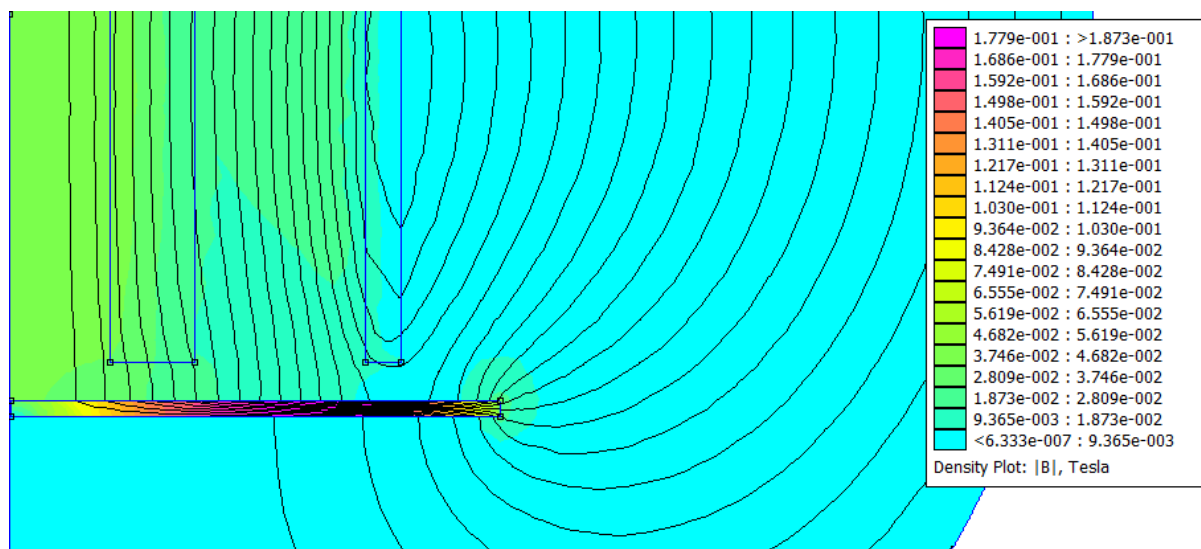


Figura A.17.- Figura A.16 ampliada on es veu el detall de les línies i el flux de camp magnètic

- Relació màxim Acer/màxim centre bobina: $\frac{\text{Màxim Acer}}{\text{Màxim centre}} = \frac{0,1871}{0,0455} = 4,11$

2.- Simulació amb FEMM 4.2 en el cas de tenir l'acer a 5mm:

- Valor en punt maxím bobina: 0,0455T
- Valor en punt màxim: 0,1514T



Figura A.18.- Simulació del camp magnètic amb l'acer a 5 mm amb el programa FEMM 4.2

- Zoom:

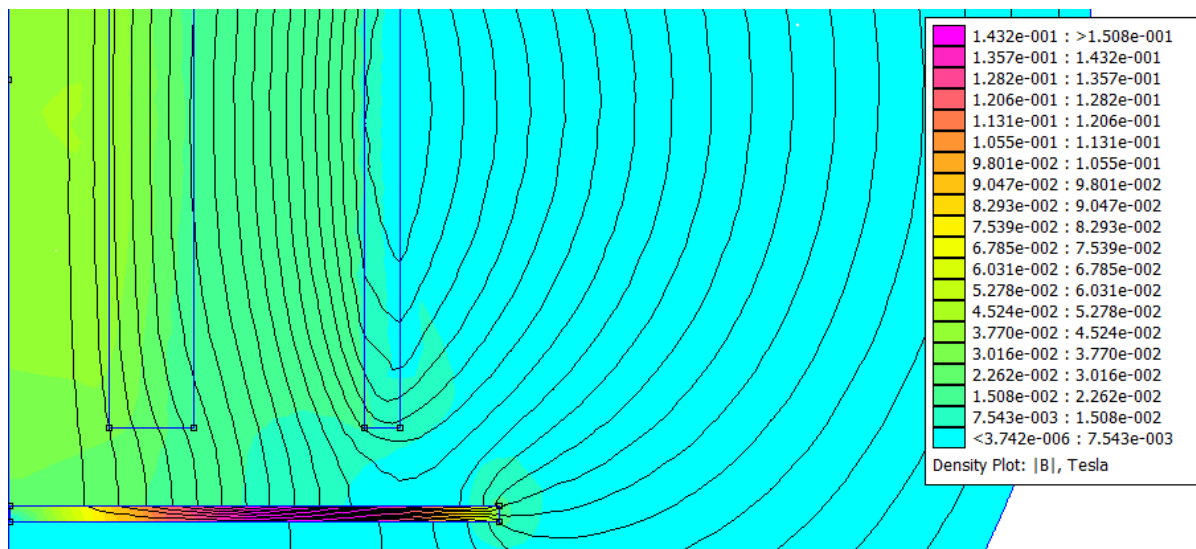


Figura A.19.- Figura A.18 ampliada on es veu el detall de les línies i el flux de camp magnètic

- Relació màxim Acer/màxim centre bobina: $\frac{Màxim\ Acer}{Màxim\ centre} = \frac{0,1514}{0,0455} = 3,32$

3.- Simulació amb FEMM 4.2 en el cas de tenir l'acer a 7,5mm:

- Valor en punt maxím bobina: 0,0455T
- Valor en punt màxim: 0,1230T



Figura A.20.- Simulació del camp magnètic amb l'acer a 7,5 mm amb el programa FEMM 4.2

- Zoom:

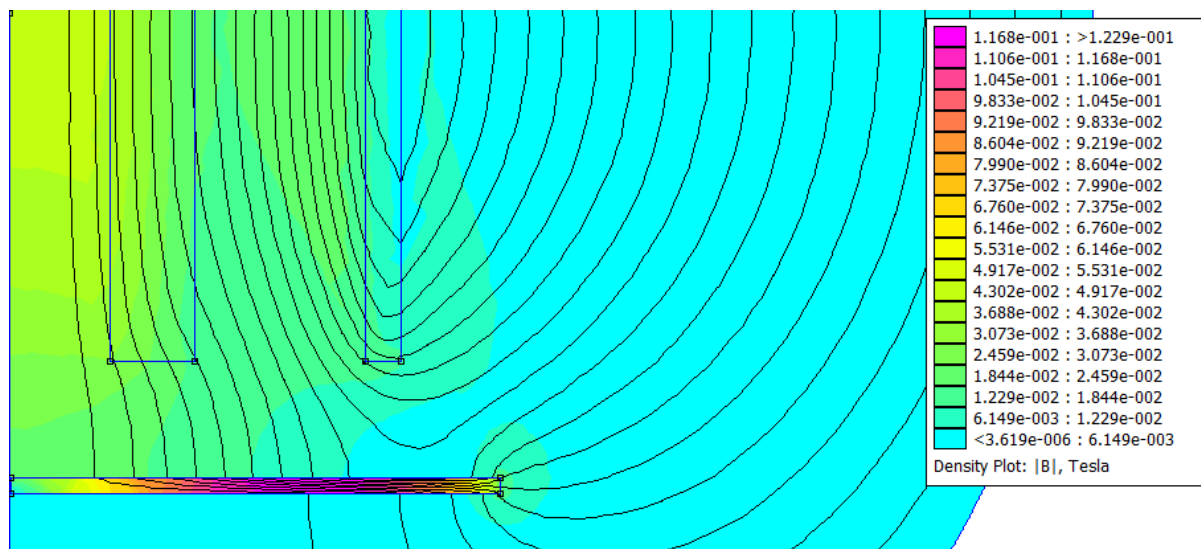


Figura A.21.- Figura A.20 ampliada on es veu el detall de les línies i el flux de camp magnètic

- Relació màxim Acer/màxim centre bobina: $\frac{\text{Màxim Acer}}{\text{Màxim centre}} = \frac{0,1230}{0,0455} = 2,70$

4.- Simulació amb FEMM 4.2 en el cas de tenir l'acer a 10mm:

- Valor en punt maxím bobina: 0,0455T
- Valor en punt màxim: 0,1010T

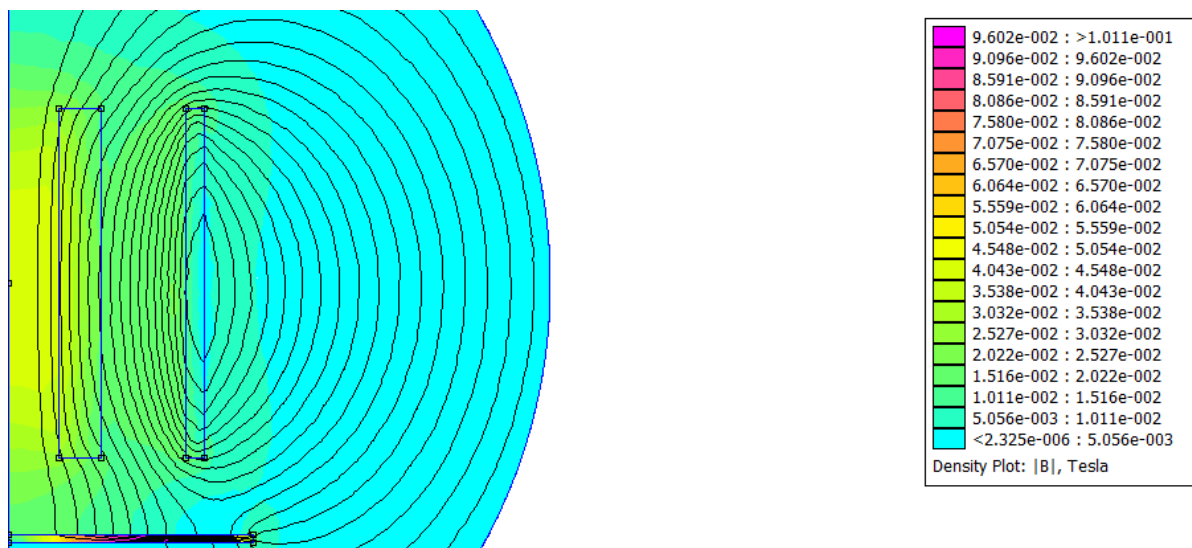


Figura A.22.- Simulació del camp magnètic amb l'acer a 10 mm amb el programa FEMM 4.2

- Zoom:

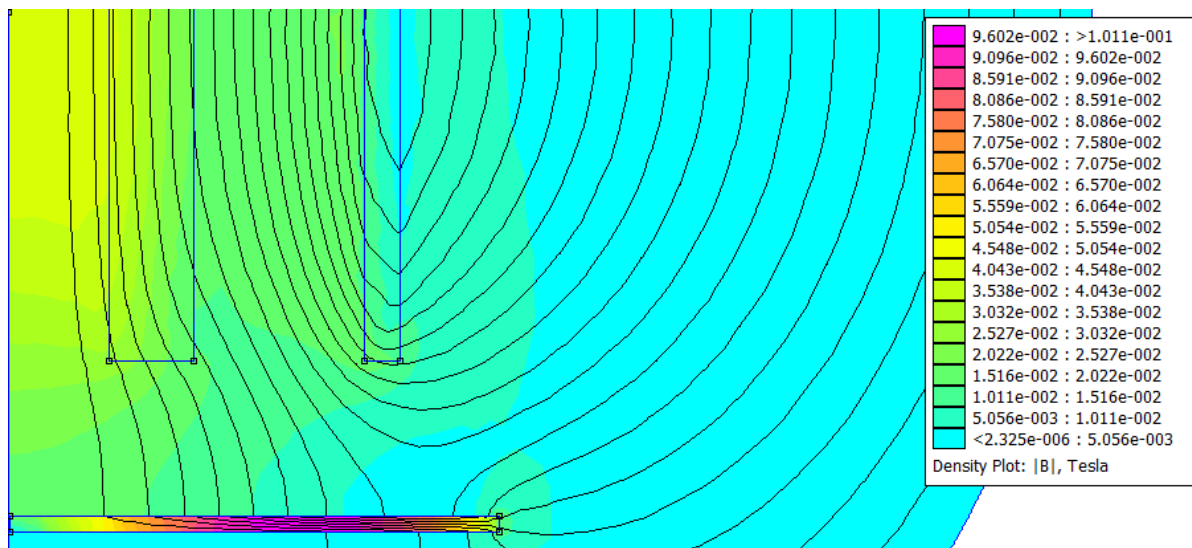


Figura A.23.- Figura A.22 ampliada on es veu el detall de les línies i el flux de camp magnètic

- Relació màxim Acer/màxim centre bobina: $\frac{\text{Màxim Acer}}{\text{Màxim centre}} = \frac{0,1010}{0,0455} = 2,21$

5.- Simulació amb FEMM 4.2 en el cas de tenir l'acer a 12,5mm:

- Valor en punt màxim bobina: 0,0455T
- Valor en punt màxim: 0,0830T



Figura A.24.- Simulació del camp magnètic amb l'acer a 10 mm amb el programa FEMM 4.2

- Zoom:

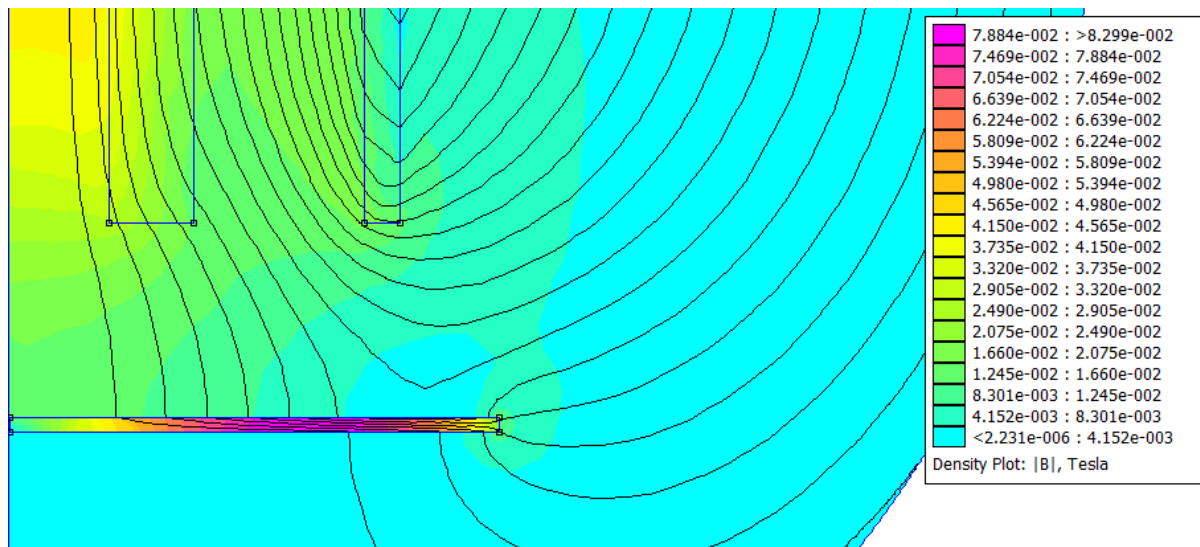


Figura A.25.- Figura A.24 ampliada on es veu el detall de les línies i el flux de camp magnètic

- Relació màxim Acer/màxim centre bobina: $\frac{\text{Màxim Acer}}{\text{Màxim centre}} = \frac{0,083}{0,0455} = 1,82$

6.- Simulació amb FEMM 4.2 en el cas de tenir l'acer a 15mm:

- Valor en punt màxim bobina: 0,0455T
- Valor en punt màxim: 0,0684T



Figura A.26.- Simulació del camp magnètic amb l'acer a 15 mm amb el programa FEMM 4.2

- Zoom:

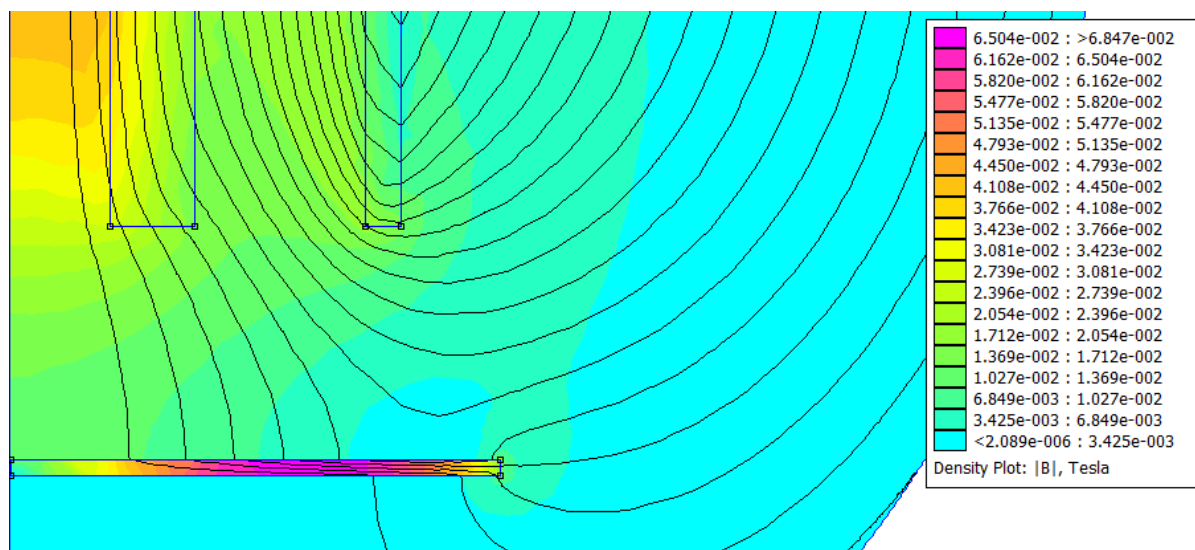


Figura A.27.- Figura A.26 ampliada on es veu el detall de les línies i el flux de camp magnètic

- Relació màxim Acer/màxim centre bobina: $\frac{\text{Màxim Acer}}{\text{Màxim centre}} = \frac{0,0684}{0,0455} = 1,50$

7.- Simulació amb FEMM 4.2 en el cas de tenir l'acer a 17,5mm:

- Valor en punt màxim bobina: 0,0455T
- Valor en punt màxim: 0,0572T



Figura A.28.- Simulació del camp magnètic amb l'acer a 17,5 mm amb el programa FEMM 4.2

- Zoom:

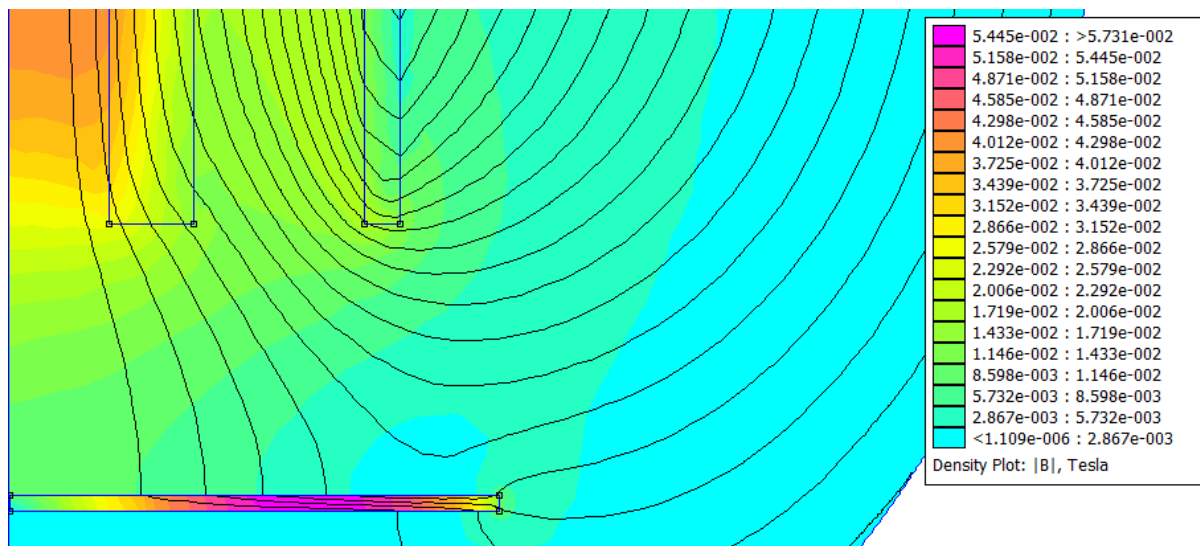


Figura A.29.- Figura A.28 ampliada on es veu el detall de les línies i el flux de camp magnètic

- Relació màxim Acer/màxim centre bobina: $\frac{\text{Màxim Acer}}{\text{Màxim centre}} = \frac{0,0572}{0,0455} = 1,25$

8.- Simulació amb FEMM 4.2 en el cas de tenir l'acer a 20mm:

- Valor en punt màxim bobina: 0,0455T
- Valor en punt màxim: 0,0478T



Figura A.30.- Simulació del camp magnètic amb l'acer a 20 mm amb el programa FEMM 4.2

- Zoom:

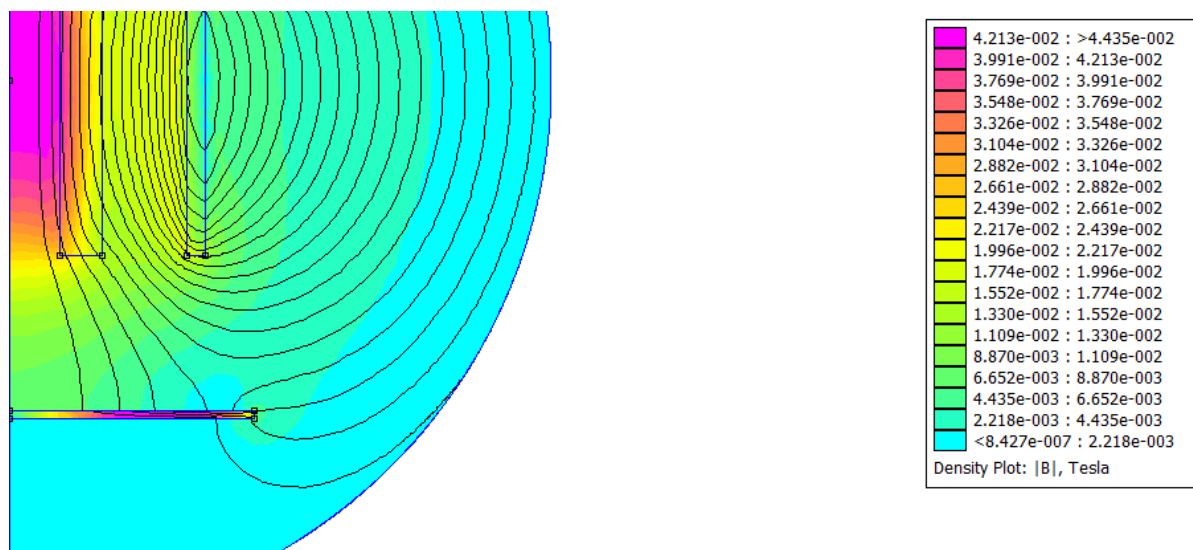


Figura A.31.- Figura A.30 ampliada on es veu el detall de les línies i el flux de camp magnètic

- Relació màxim Acer/màxim centre bobina: $\frac{Màxim\ Acer}{Màxim\ centre} = \frac{0,0478}{0,0455} = 1,05$

9.- Simulació amb FEMM 4.2 en el cas de tenir l'acer a 22,5mm:

- Valor en punt màxim bobina: 0,0455T
- Valor en punt màxim: 0,0397T



Figura A.32.- Simulació del camp magnètic amb l'acer a 22,5 mm amb el programa FEMM 4.2

- Zoom:

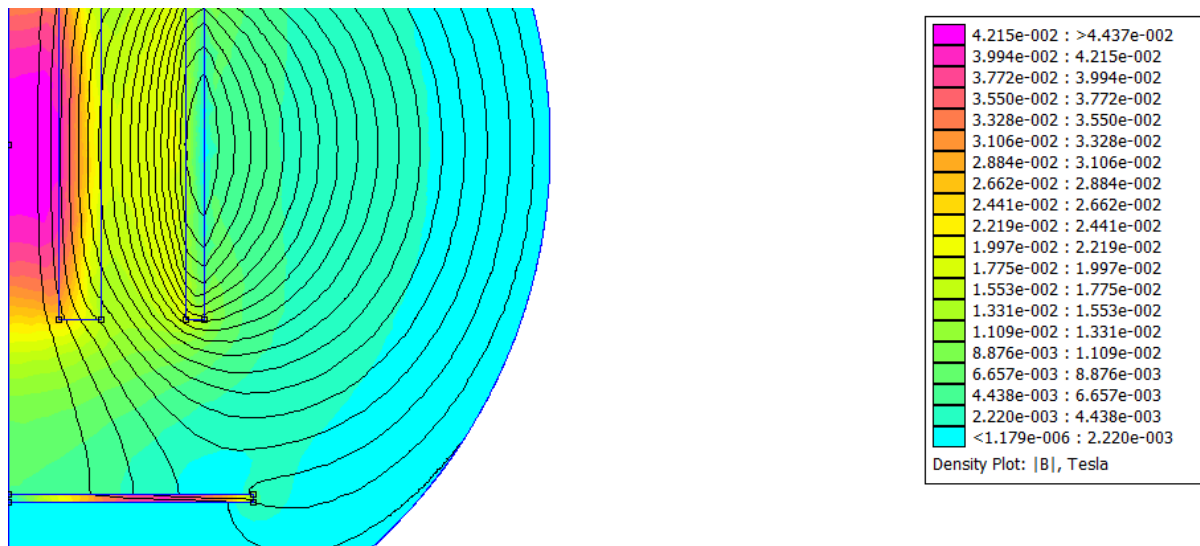


Figura A.33.- Figura A.32 ampliada on es veu el detall de les línies i el flux de camp magnètic

- Relació màxim Acer/màxim centre bobina: $\frac{\text{Màxim Acer}}{\text{Màxim centre}} = \frac{0,0397}{0,0455} = 0,87$

10.- Taula resum resultats

Bobina Concèntrica		
Distància (mm)	Valor màxim (T)	Relació Acer/centre
2,5	0,1871	4,11
5	0,1514	3,32
7,5	0,1230	2,7
10	0,1010	2,21
12,5	0,083	1,82
15	0,0684	1,5
17,5	0,0572	1,25
20	0,0478	1,05
22,5	0,0397	0,87

Figura A.34.- Taula resum dels resultats obtinguts amb el programa FEMM 4.2 dels valors de camp magnètic

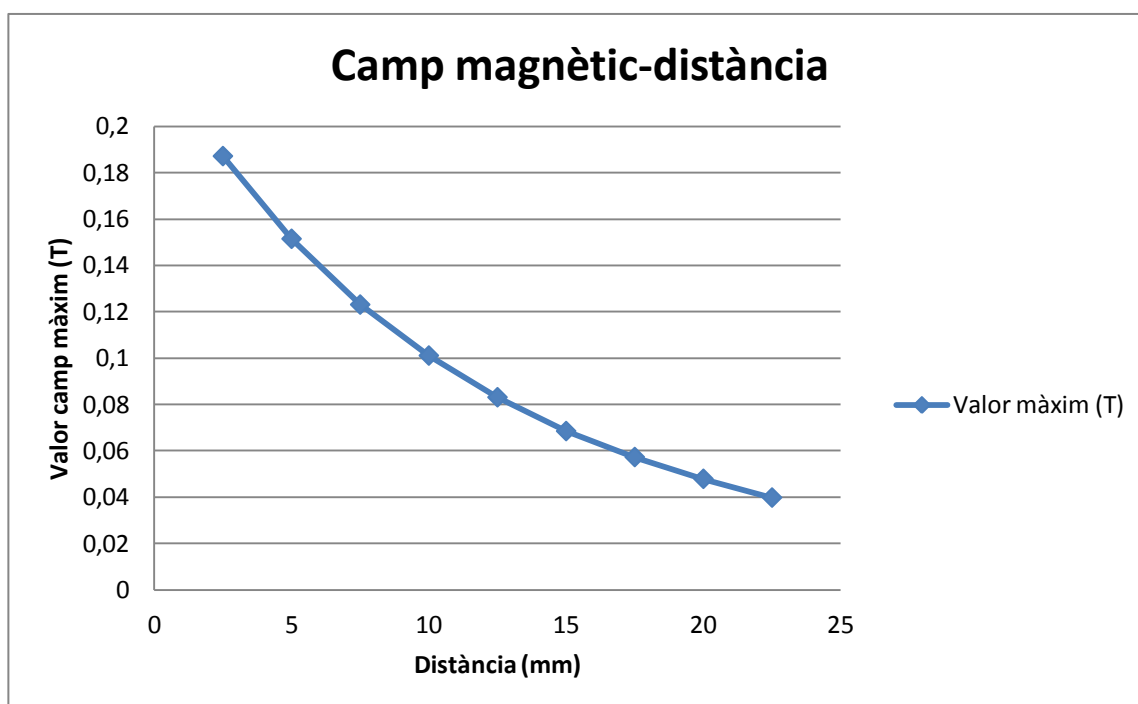
11.- Gràfica valor camp màxim- distància bobina concèntrica:

Figura A.35.- Gràfica del valor camp magnètic màxim- distància de la bobina concèntrica.

12.- Gràfica relació acer-centre bobina concèntrica:

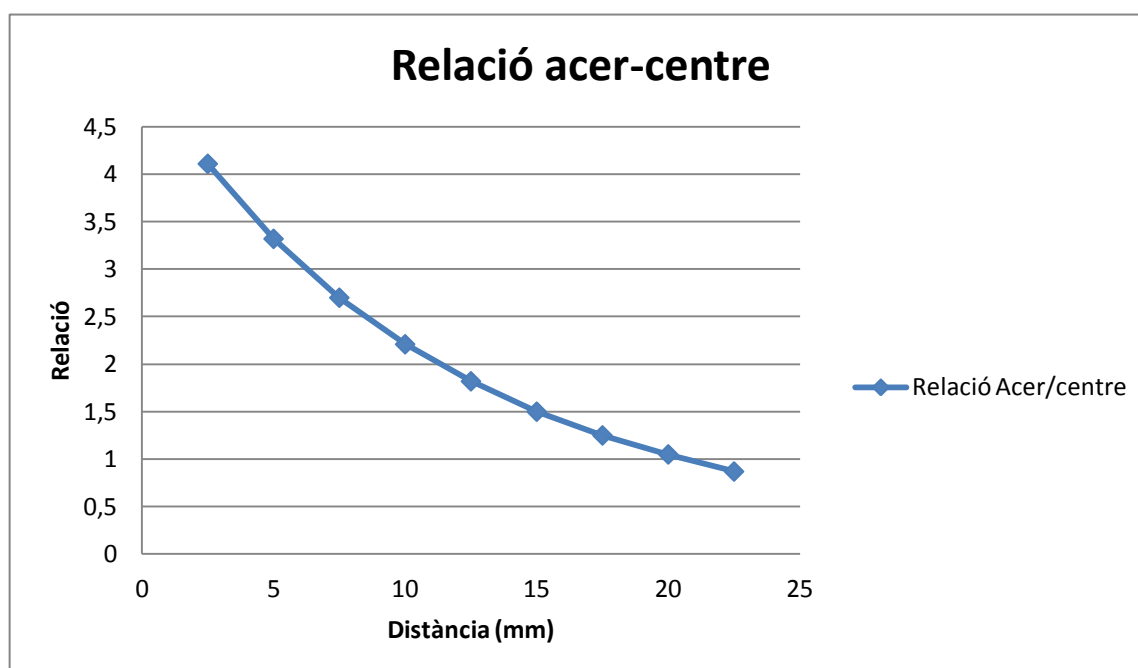


Figura A.36.- Gràfica de la relació entre el valor mesurat en el centre de la bobina i el valor mesurat en el punt de màxim camp del cilindre d'acer

B. Demostració de la oscil·lació de les mesures amb el condensador en paral·lel

En aquest annex s'hi troba una possible demostració de la oscil·lació que es registra en la mesura de la inductància quan es té l'estructura del condensador en paral·lel a la bobina i s'hi produeix una mínima variació en l'entorn del sistema de mesura.

Partint del circuit equivalent de la Il·lustració 22, tenim que l'admitància del circuit és:

$$Y = j\omega C + \frac{1}{R_p} + \frac{1}{j\omega L} \quad (\text{B.1})$$

Si a continuació, a l'equació B.1. agrupem tots els termes obtenim:

$$Y = \frac{-\omega^2 CL R_p + j\omega L + R_p}{j\omega L R_p}$$

Sabent que $Z = \frac{1}{Y}$ podem expressar la impedància com:

$$Z = \frac{j\omega L R_p}{-\omega^2 CL R_p + R_p + j\omega L} \quad (\text{B.2})$$

Tot seguit, es retoca l'equació B.2 per tal d'aconseguir tenir el denominador amb nombres reals:

$$\begin{aligned} Z &= \frac{j\omega L R_p}{-\omega^2 CL R_p + R_p + j\omega L} \cdot \frac{-\omega^2 CL R_p + R_p - j\omega L}{-\omega^2 CL R_p + R_p - j\omega L} = \frac{-j\omega^3 CL^2 R_p^2 + j\omega L R_p^2 + \omega^2 L^2 R_p}{(-\omega^2 CL R_p + R_p)^2 + \omega^2 L^2} \\ &= \frac{-j\omega^3 CL^2 + j\omega L + \frac{\omega^2 L^2}{R_p}}{(-\omega^2 CL + 1)^2 + \left(\frac{\omega L}{R_p}\right)^2} = \frac{j\omega L(-\omega^2 CL + 1) + \frac{\omega^2 L^2}{R_p}}{(1 - \omega^2 CL)^2 + \left(\frac{\omega L}{R_p}\right)^2} \end{aligned}$$

Si sabem que el sistema global ha de ser equivalent a $Z = j\omega L_{eq} + R_{eq}$, associant termes tenim que:

$$L_{eq} = \frac{L(1 - \omega^2 CL)}{(1 - \omega^2 CL)^2 + \left(\frac{\omega L}{R_p}\right)^2} \quad (\text{B.3})$$

Si desenvolupem ara l'equació B.3 i tenim en compte que $\omega_r^2 = \frac{1}{LC}$ podem retocar l'equació B.3 de la següent manera:

$$L_{eq} = \frac{L \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right)^2 \right)}{1 - 2 \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right)^2 + \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right)^4 + \left(\frac{\omega L}{R_p} \right)^2} = \frac{L \left(1 - \left(\frac{\omega}{\omega_r} \right)^2 \right)}{1 + \omega^2 \left(\left(\frac{L}{R_p} \right)^2 - \frac{2}{\omega_r^2} \right) + \left(\frac{\omega^2}{\omega_r^2} \right)^2}$$

Considerant ara que $\omega^2 = (1 - \varepsilon)\omega_r^2$ tal que $0 < \varepsilon \ll 1$ obtenim:

$$L_{eq} = \frac{L\varepsilon}{1 + (1 - \varepsilon) \left(\left(\frac{L\omega_r}{R_p} \right)^2 - 2 \right) + (1 - \varepsilon)^2}$$

Finalment si associem $L = \frac{1}{C\omega_r^2}$ i $\frac{L}{R_p} = \frac{1}{CR_p\omega_r^2}$ tenim que:

$$L_{eq} = \frac{L\varepsilon}{1 + (1 - \varepsilon) \left(\left(\frac{1}{CR_p\omega_r} \right)^2 - 2 \right) + (1 - \varepsilon)^2} = \frac{L\varepsilon}{(1 - \varepsilon) \left(\frac{1}{CR_p\omega_r} \right)^2 + \varepsilon^2} \quad (B.4)$$

A continuació procedim a l'anàlisi de la inductància de la nostra bobina en freqüències pròximes a la freqüència de ressonància. Per aquest cas tenim que $\omega^2 = (1 - \varepsilon)\omega_r^2$ amb $\varepsilon \cong 0$. Així doncs, si fem el límit de l'equació B.4 quan $\varepsilon \cong 0$ tenim que:

$$\lim_{\varepsilon \rightarrow 0} L_{eq} = \frac{L\varepsilon}{\left(\frac{1}{CR_p\omega_r} \right)^2} = \varepsilon L (CR_p\omega_r)^2 \quad (B.5)$$

Si analitzem ara l'expressió B.5 veiem que la inductància equivalent resultant depèn de la variació respecte la freqüència de ressonància que serà un terme infinitesimal i del valor elevat del terme $(CR_p\omega_r)^2$.

Així doncs, es demostra que, quan es mesura la inductància prop de la freqüència de ressonància, la darrera xifra significativa oscil·la, ja que les incerteses associades a ε i a la resta de components (C, R_p i ω_r) se sumen sempre i mai es compensen.

D'aquesta manera, es pot demostrar també l'augment de la inductància mesurada a freqüències a prop de la ressonància. A continuació es detalla un exemple numèric per a comprovar tal fet.

Suposem que tenim el sistema descrit per la Il·lustració 22 tal que $C=2,2\text{nF}$, $R_p=10^8\Omega$ i $\omega_r = 2 \cdot \pi \cdot 4 \cdot 10^3 \text{rad/s}$.

En aquest cas, suposant que treballem amb $\varepsilon = 0,1$ i substituint en l'expressió B.5 obtenim que $L_{eq} = 3,7 \cdot 10^7 \cdot L$, un valor que multiplica al mesurat en la bobina concèntrica del nostre cas: $L=45 \text{ mH}$.

C.Mesures inductància bobina gran

En aquest apartat de l'annex s'hi troben totes les mesures realitzades amb la bobina exterior a diferents freqüències. Destaca l'augment de la inductància a mesura que les mesures s'acosten a la freqüència de ressonància.

Distància (mm)	Inductància a 1kHz (mH)	% relació	Inductància a 10KHz (mH)	% relació	Inductància a 50KHz (mH)	% relació
buit	33,32	0	33,45	0	161,2	0
0	33,6	0,84	33,73	0,84	164,4	1,99
2,5	33,52	0,60	33,65	0,60	163,1	1,18
5	33,45	0,39	33,59	0,42	162	0,50
7,5	33,41	0,27	33,55	0,30	161,6	0,25
10	33,4	0,24	33,54	0,27	161,5	0,19
12,5	33,36	0,12	33,51	0,18	161,3	0,06
15	33,36	0,12	33,5	0,15	161,2	0,00
18,5	33,34	0,06	33,49	0,12	161,2	0,00
22	33,33	0,03	33,48	0,09	161,2	0,00

Figura C.1.- Taula de resultats de les mesures de la inductància de la bobina exterior a diferents distàncies respecte a un pla de fibres. S'hi destaca la gran variació respecte el buit a prop de la freqüència de ressonància, tot i el ball de xifres significatives que s'hi produeix a l'hora de realitzar la mesura.

Distància (mm)	Inductància a 53kHz (mH)	% relació	Inductància a 55kHz (mH)	% relació
buit	307	0	920	0
0	328,2	6,91	1080	17,39
2,5	323,1	5,24	1030	11,96
5	318,9	3,88	990	7,61
7,5	317,2	3,32	970	5,43
10	317,3	3,36	960	4,35
12,5	315	2,61	950	3,26
15	315	2,61	950	3,26
18,5	314	2,28	940	2,17
22	313,1	1,99	930	1,09

Figura C.2.- Taula de resultats de les mesures de la inductància de la bobina exterior a diferents distàncies respecte a un pla de fibres. S'hi destaca la gran variació

(17,39%) respecte el buit a prop de la freqüència de ressonància, tot i el ball de xifres significatives que s'hi produeix a l'hora de realitzar la mesura.

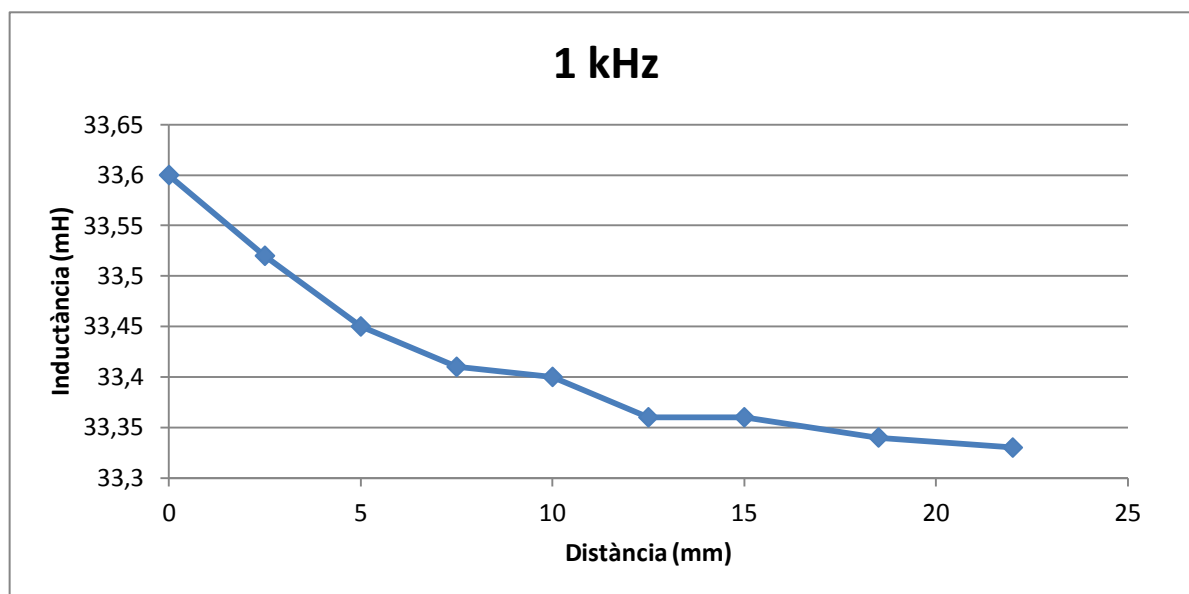


Figura C.3.- Gràfica de la variació de la inductància mesurada a 1 kHz en funció de la distància al pla de fibres.

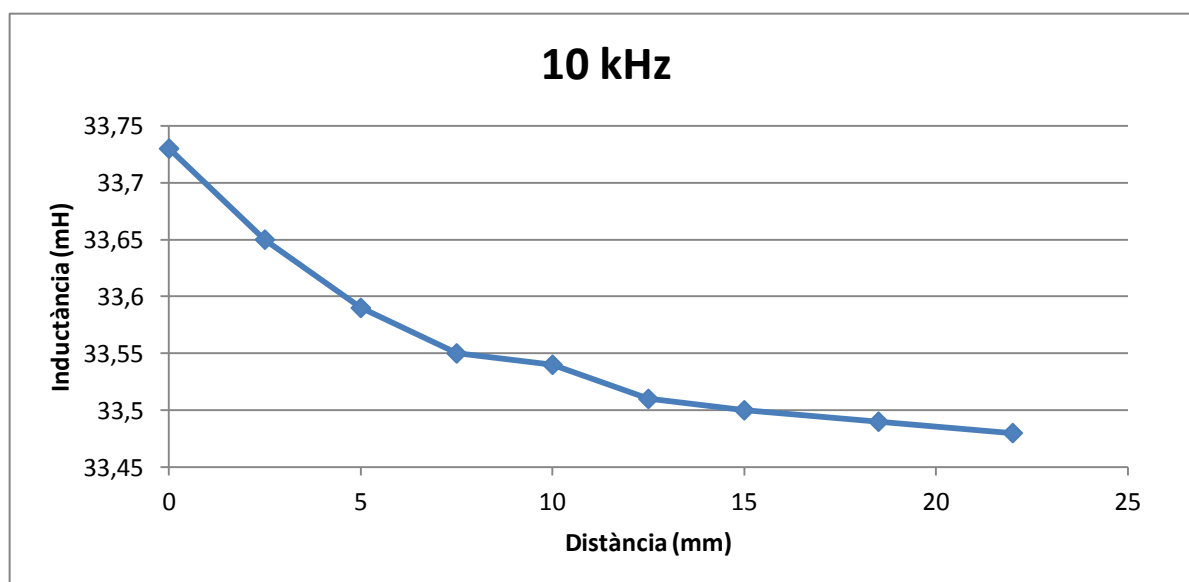


Figura C.4.- Gràfica de la variació de la inductància mesurada a 10 kHz en funció de la distància al pla de fibres.

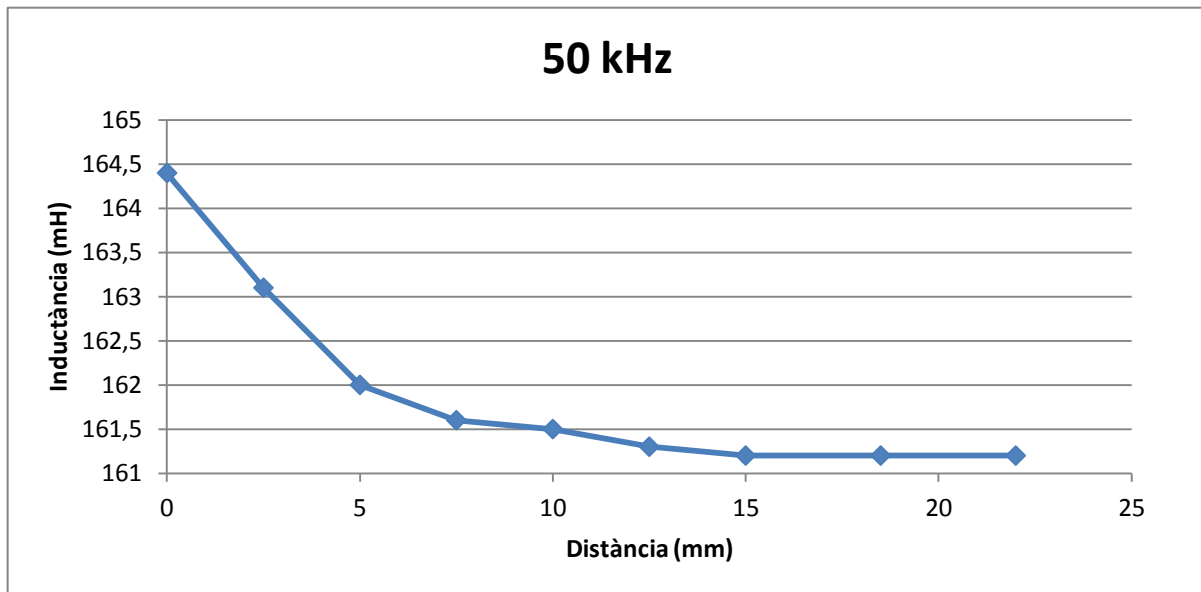


Figura C.5.- Gràfica de la variació de la inductància mesurada a 50 kHz en funció de la distància al pla de fibres.

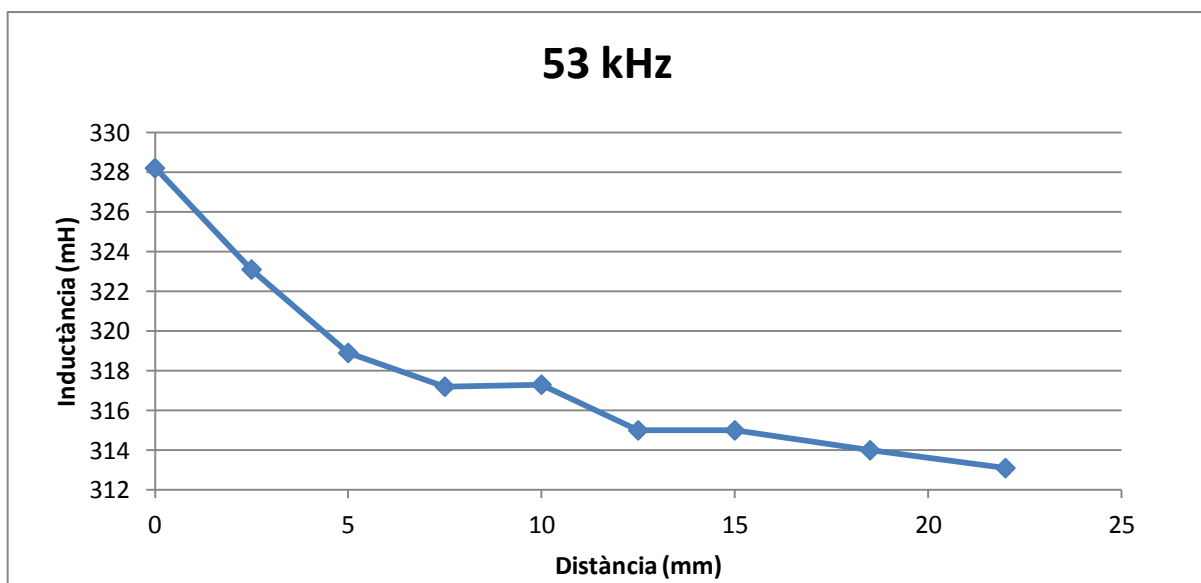


Figura C.6.- Gràfica de la variació de la inductància mesurada a 53 kHz en funció de la distància al pla de fibres.

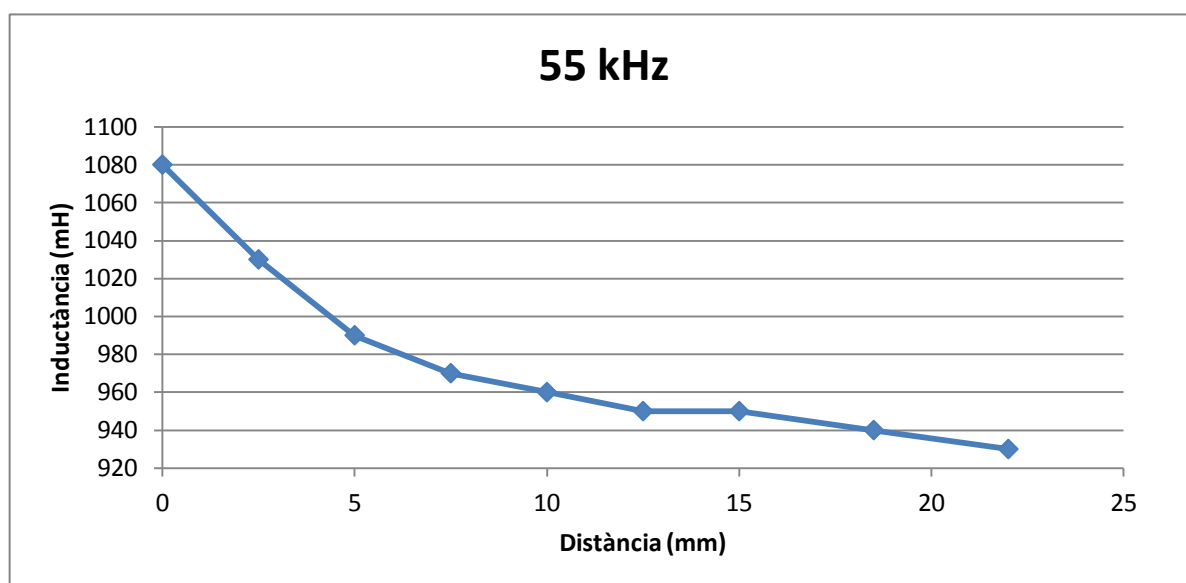


Figura C.7.- Gràfica de la variació de la inductància mesurada a 55 kHz en funció de la distància al pla de fibres.

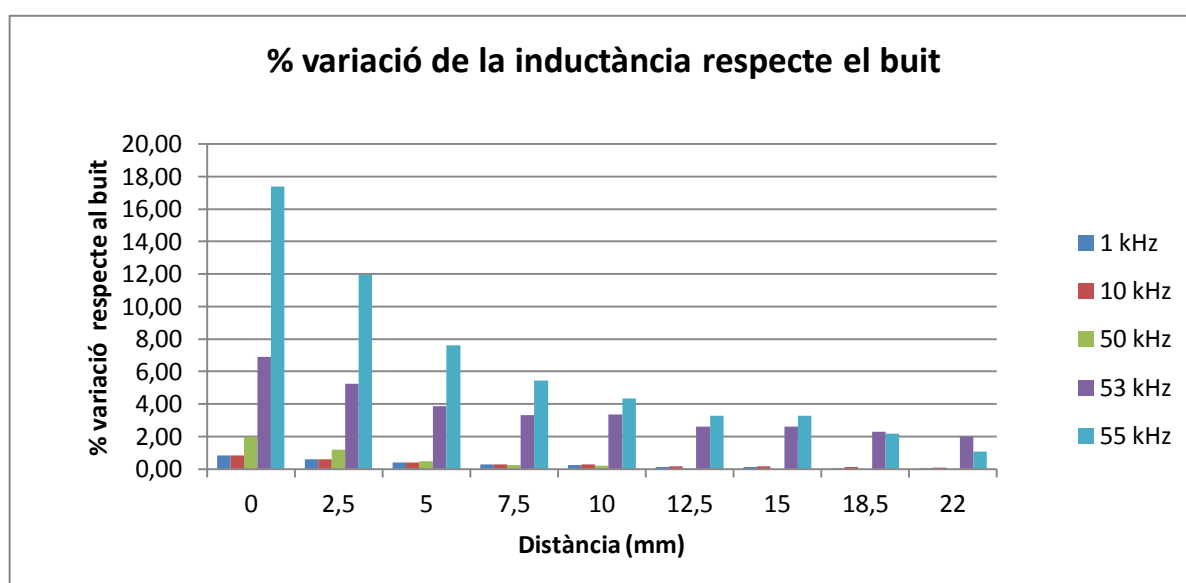


Figura C.8.- Gràfica del percentatge de variació respecte al buit de la inductància de la bobina exterior en funció de la distància a diferents freqüències.

D.Mesures inductància bobina concèntrica sense condensador en paral·lel respecte a un pla de fibres

En aquest apartat de l'annex s'hi troben totes les mesures realitzades per la bobina concèntrica sense tenir el condensador en paral·lel. Aquestes mesures s'han fet en funció de la distància respecte a un pla de fibres a diferents freqüències per tal de veure'n la variació respecte la freqüència.

Distància (mm)	Inductància a 1 kHz (mH)	% relació	Inductància a 10 kHz (mH)	% relació	Inductància a 50 kHz (mH)	% relació
buit	44,54	0	44,65	0	222,9	0
0	44,95	0,92	45,03	0,85	228,3	2,42
2,5	44,82	0,63	44,91	0,58	226	1,39
5	44,73	0,43	44,84	0,43	225,1	0,99
7,5	44,68	0,31	44,79	0,31	224,1	0,54
10	44,64	0,22	44,75	0,22	224,2	0,58
12,5	44,61	0,16	44,73	0,18	224,1	0,54
15	44,6	0,13	44,71	0,13	224	0,49
17,5	44,58	0,09	44,7	0,11	223,7	0,36
20	44,57	0,07	44,69	0,09	223,2	0,13
22,5	44,57	0,07	44,68	0,07	223	0,04
25	44,56	0,04	44,68	0,07	223	0,04

Figura D.1.- Taula de les mesures realitzades amb la bobina concèntrica a les freqüències de 1 kHz, 10 kHz i 50 kHz respecte al pla de fibres. Com en el cas de la bobina exterior en destaca l'augment de sensibilitat a mesura que s'augmenta la freqüència de mesura. A diferència del cas de la bobina exterior, amb la bobina concèntrica s'obté més diferència respecte el valor mesurat en el buit.

Distància (mm)	Inductància a 52 kHz (mH)	% relació	Inductància a 53 kHz (mH)	% relació
buit	348,7	0	500	0
0	363,7	4,30	530	6,00
2,5	358,5	2,81	510	2,00
5	354,3	1,61	510	2,00
7,5	352,6	1,12	500	0,00
10	351,7	0,86	500	0,00
12,5	351	0,66	500	0,00
15	350,4	0,49	500	0,00
17,5	349,3	0,17	500	0,00
20	349,1	0,11	500	0,00
22,5	348,9	0,06	500	0,00
25	348,7	0,00	500	0,00

Figura D.2.- Taula de les mesures realitzades amb la bobina concèntrica a les freqüències de 52 kHz i 53 kHz respecte al pla de fibres. Com en el cas de la bobina exterior en destaca l'augment de sensibilitat a mesura que s'augmenta la freqüència de mesura. A diferència del cas de la bobina exterior, amb la bobina concèntrica s'obté més diferència respecte el valor mesurat en el buit.

Distància (mm)	Inductància a 54 kHz (mH)	% relació	Inductància a 55 kHz (mH)	% relació
buit	860	0	3950	0
0	960	11,63	6730	70,38
2,5	930	8,14	5300	34,18
5	910	5,81	4760	20,51
7,5	900	4,65	4520	14,43
10	890	3,49	4430	12,15
12,5	880	2,33	4430	12,15
15	870	1,16	4400	11,39
17,5	870	1,16	4280	8,35
20	870	1,16	4090	3,54
22,5	870	1,16	4020	1,77
25	860	0,00	4010	1,52

Figura D.3.- Taula de les mesures realitzades amb la bobina concèntrica a les freqüències de 54 kHz i 55 kHz respecte al pla de fibres. Com en el cas de la bobina exterior en destaca l'augment de sensibilitat a mesura que s'augmenta la freqüència de mesura. A diferència del cas de la bobina exterior, amb la bobina concèntrica s'obté més diferència respecte el valor mesurat en el buit.

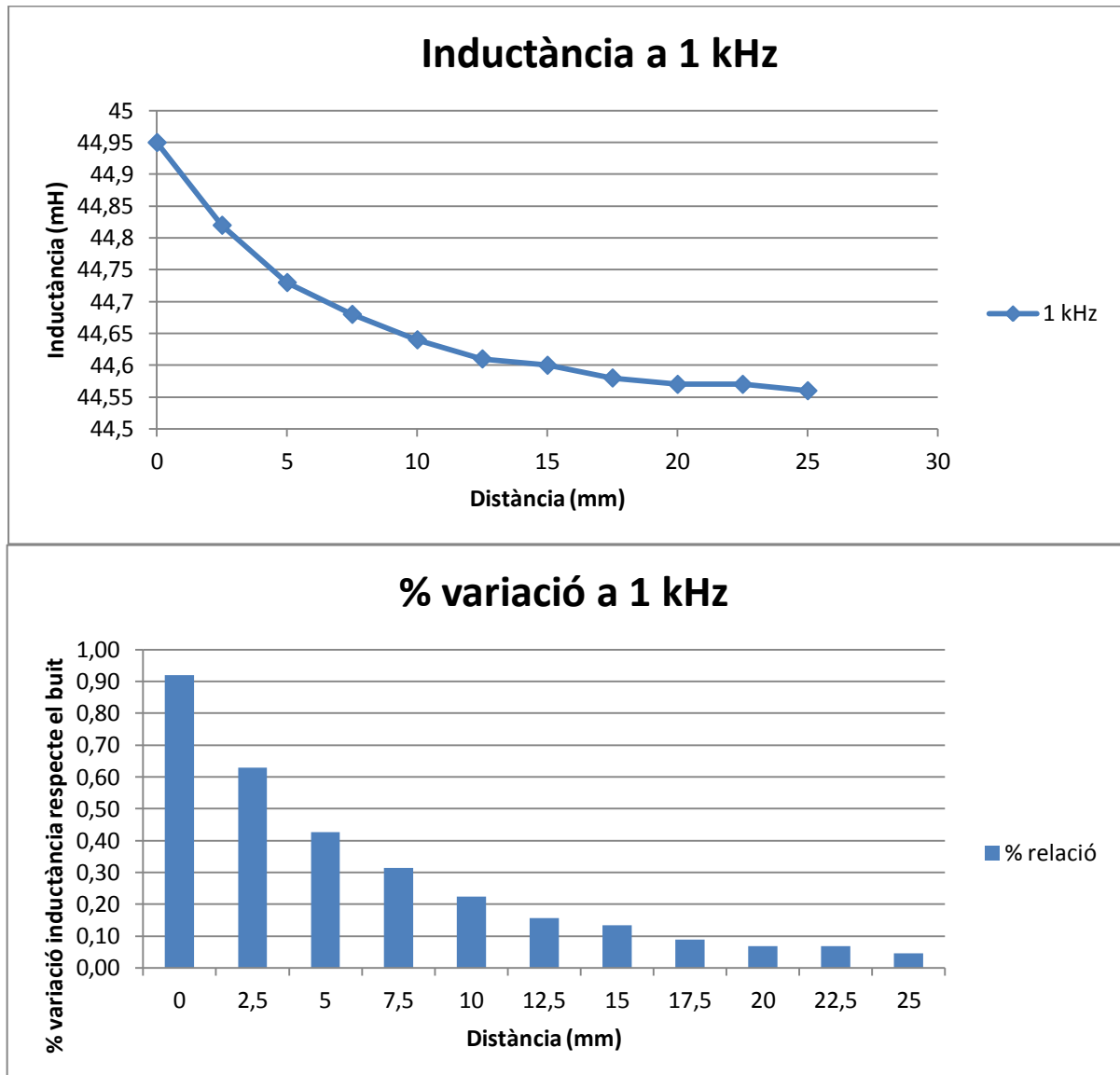


Figura D.4.- Gràfiques de la inductància mesurada a 1 kHz i el seu percentatge de variació respecte el buit. Com es pot observar, ambdós casos segueixen un model exponencial d'exponent negatiu. En aquest cas, la inductància no varia més de un 1% respecte el valor en el buit.

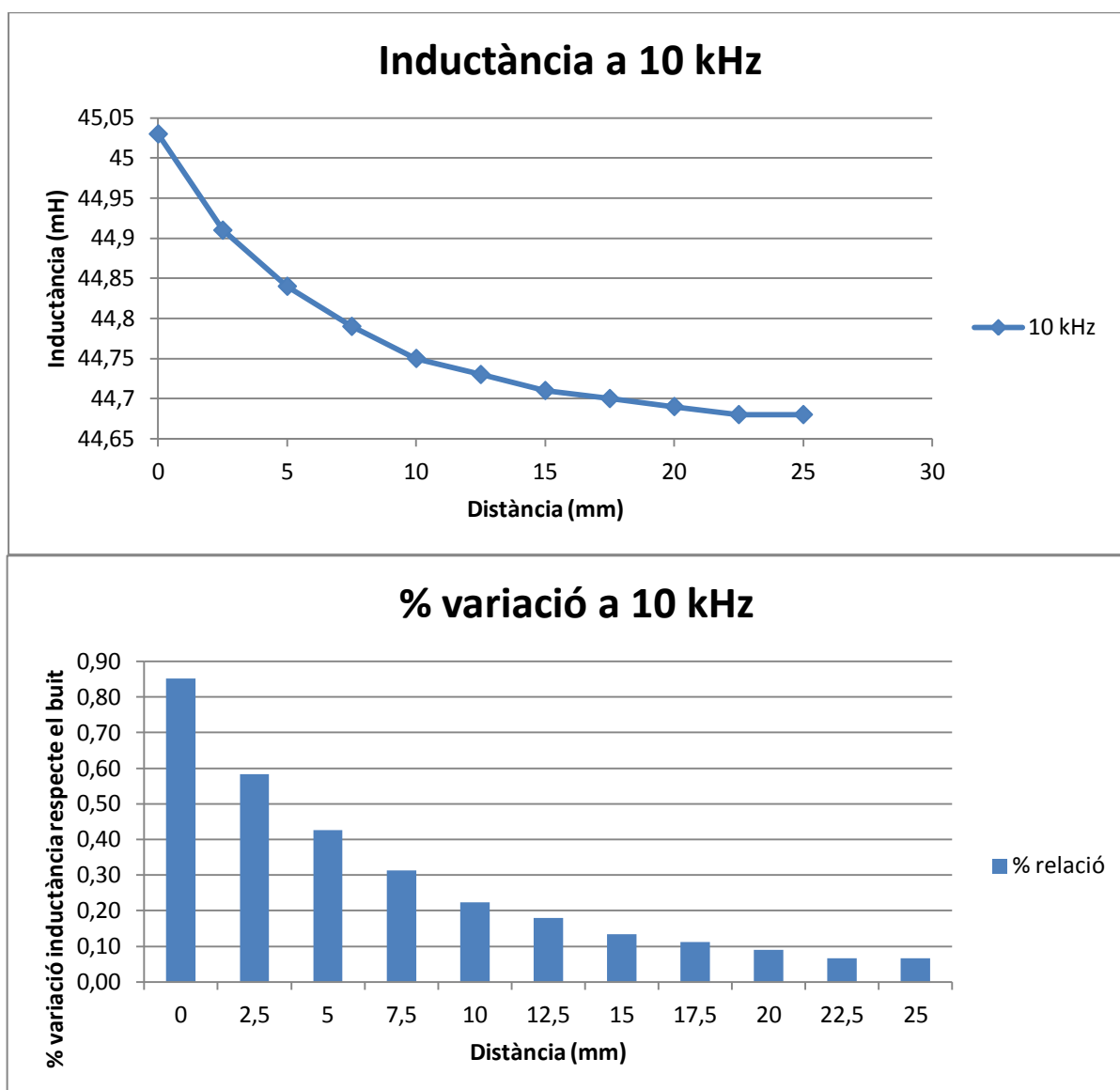


Figura D.5.- Gràfiques de la inductància mesurada a 10 kHz i el seu percentatge de variació respecte el buit. Com es pot observar, ambdós casos segueixen un model exponencial d'exponent negatiu. En aquest cas, molt semblant al cas anterior, la inductància no varia més d'un 1% respecte el valor en el buit.

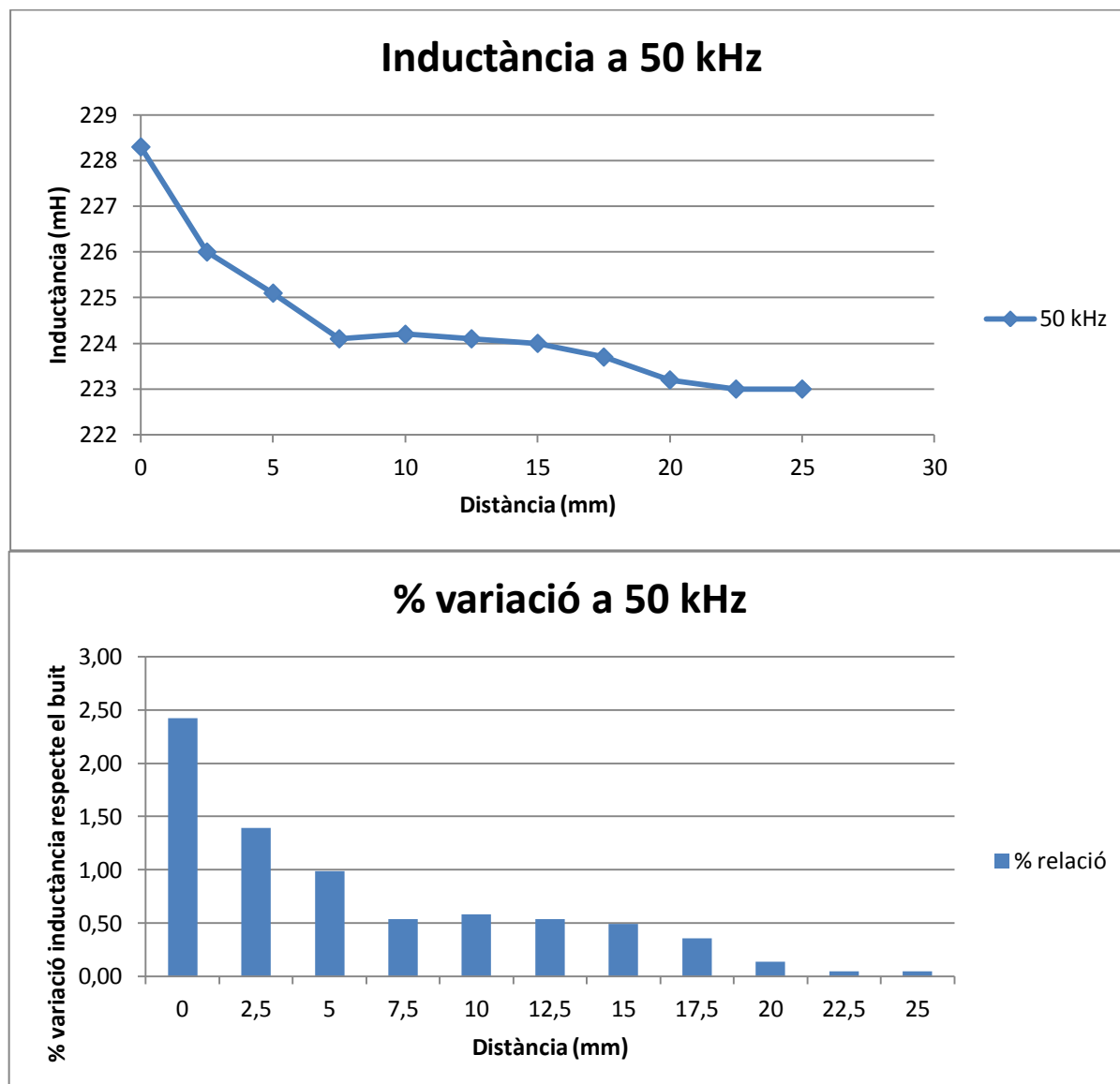


Figura D.6.- Gràfiques de la inductància mesurada a 50 kHz i el seu percentatge de variació respecte el buit. Com es pot observar, ambdós casos segueixen un model exponencial d'exponent negatiu. En aquest cas, els valors d'inductància i el percentatge de variació respecte el buit ja són més elevats. A diferència dels casos anteriors, la inductància varia aproximadament un 2,5% respecte el valor en el buit a 0 mm.

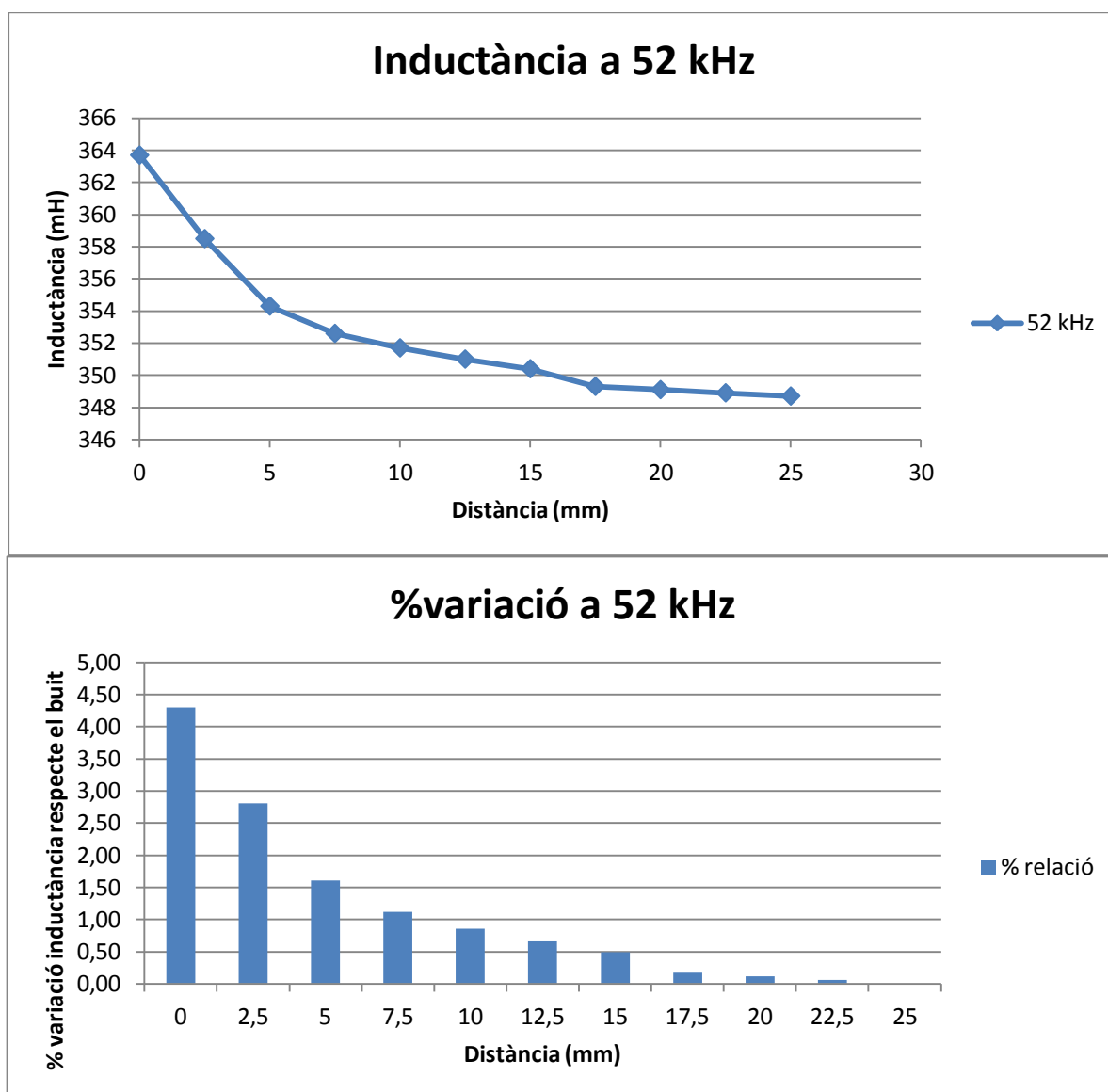


Figura D.7.- Gràfiques de la inductància mesurada a 52 kHz i el seu percentatge de variació respecte el buit. Com es pot observar, ambdós casos segueixen un model exponencial d'exponent negatiu. En aquest cas, els valors d'inductància i el percentatge de variació respecte el buit són encara més elevats que en el cas anterior. Es pot observar que a 52 kHz la inductància varia aproximadament un 4,25% respecte el valor en el buit a 0 mm.

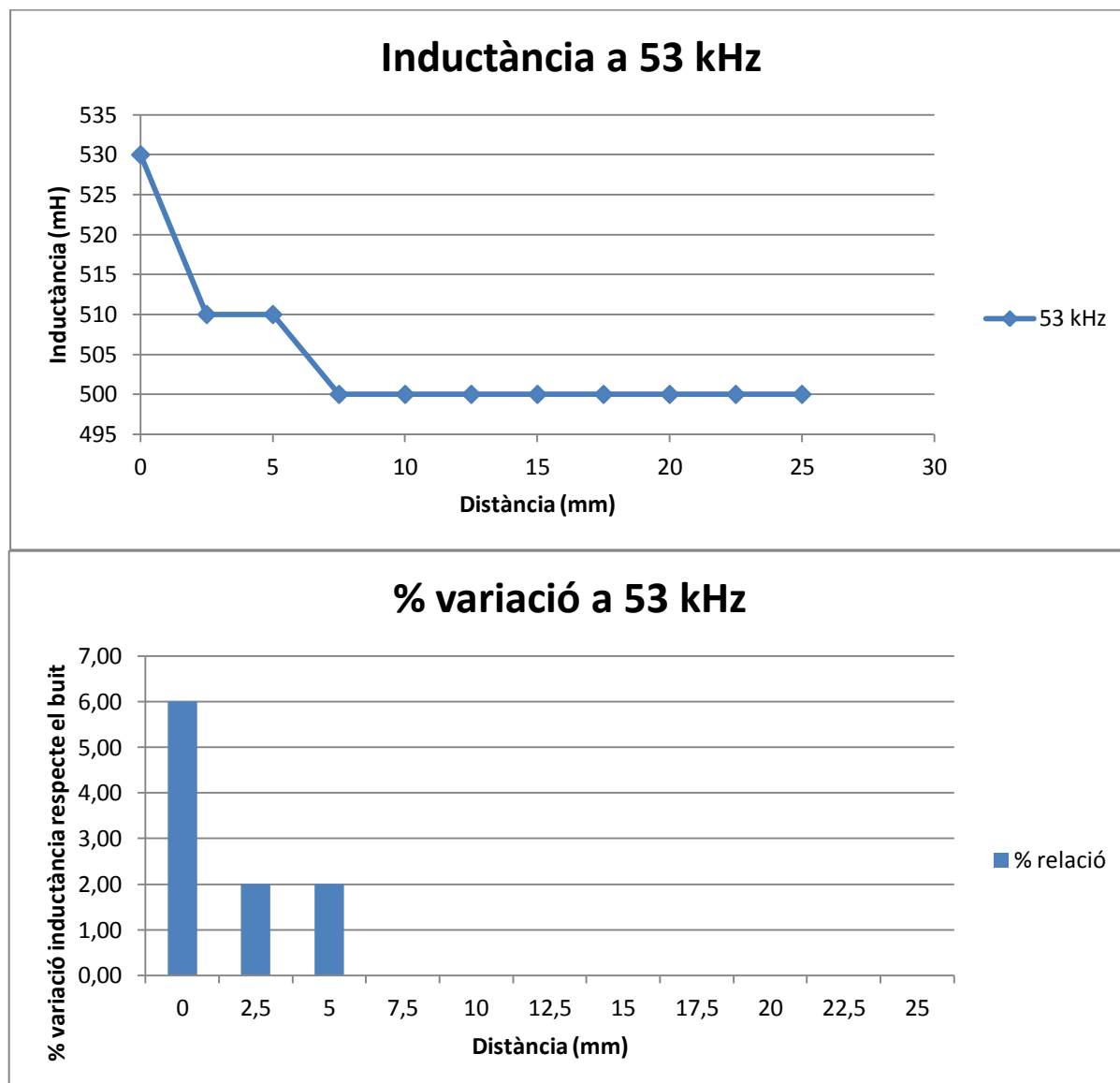


Figura D.8.- Gràfiques de la inductància mesurada a 53 kHz i el seu percentatge de variació respecte el buit. En aquest cas en particular, degut al canvi de xifres significatives de l'analitzador d'impedàncies no tenim la resolució òptima per veure'n la diferència i a partir de 7.5 mm ja no es registra variació d'impedància. De totes maneres, es pot observar que a 53 kHz la inductància varia aproximadament un 6% respecte el valor en el buit a 0 mm.

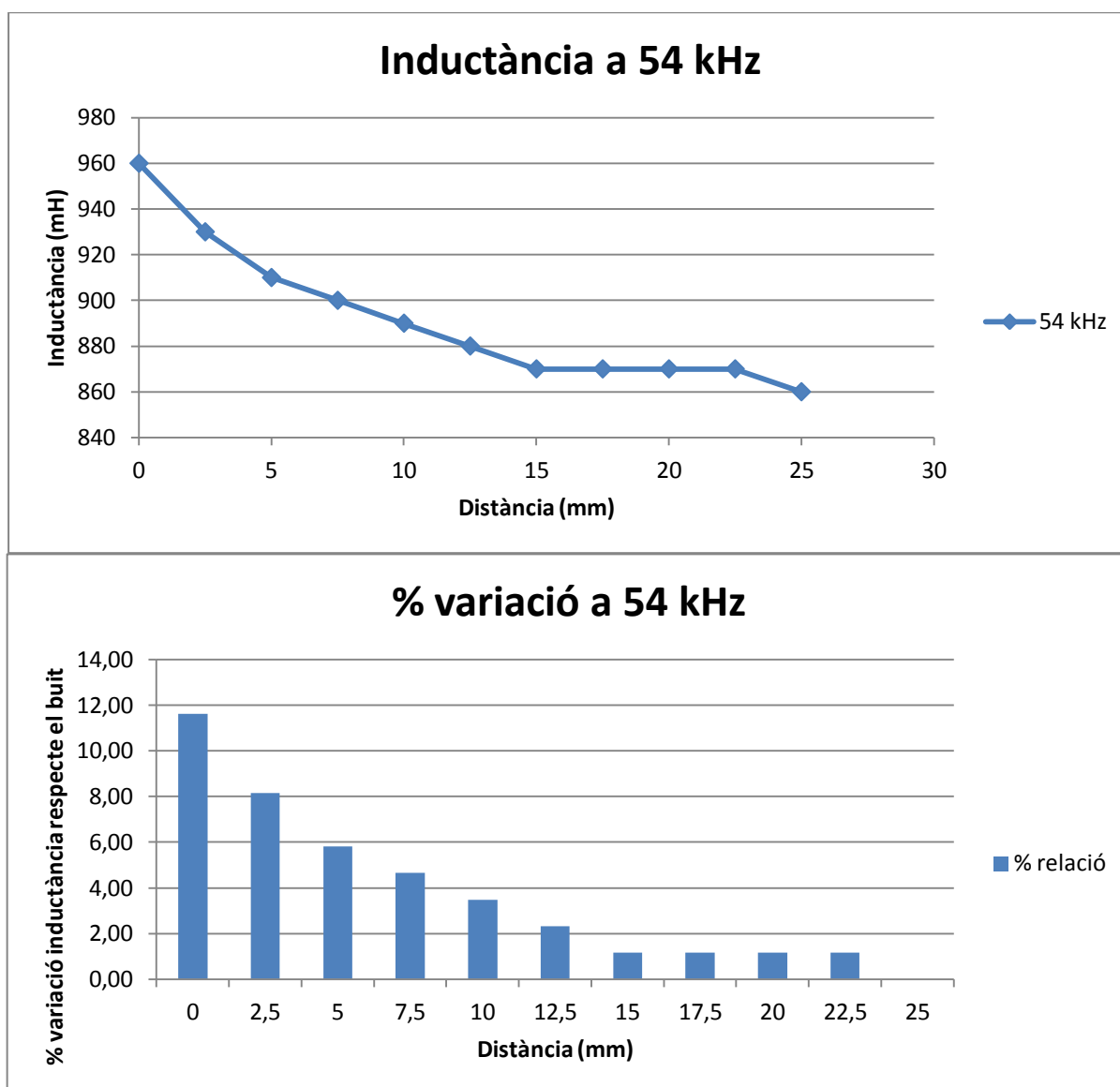


Figura D.9.- Gràfiques de la inductància mesurada a 54 kHz i el seu percentatge de variació respecte el buit. Com es pot observar, ambdós casos segueixen un model exponencial d'exponent negatiu. En aquest cas, els valors d'inductància i el percentatge de variació respecte el buit són molt més elevats que en el cas anterior. Es pot observar que a 54 kHz la inductància varia de l'ordre del 12% respecte el valor en el buit a 0 mm.

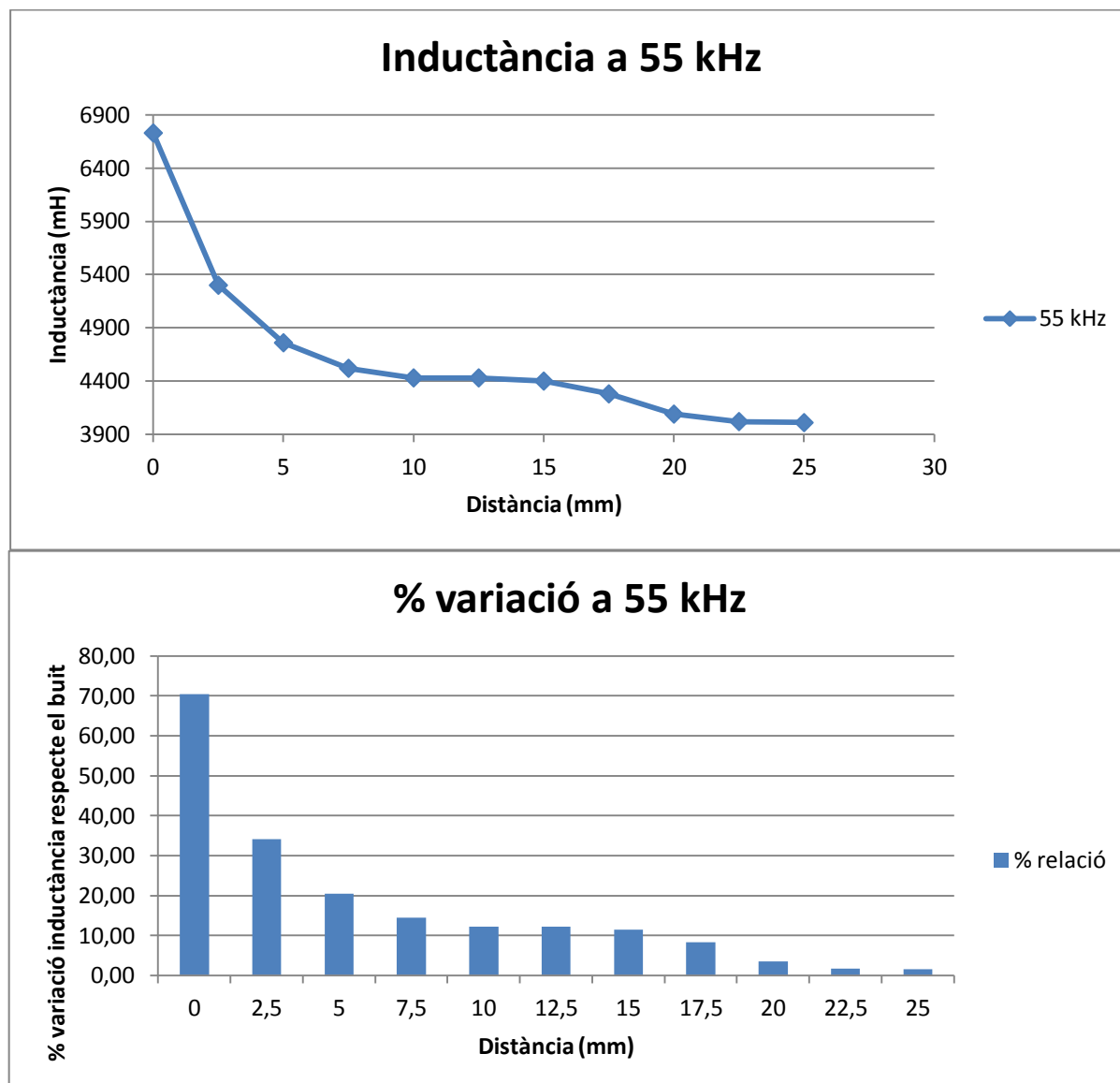


Figura D.10.- Gràfiques de la inductància mesurada a 55 kHz i el seu percentatge de variació respecte el buit. Com es pot observar, ambdós casos segueixen un model exponencial d'exponent negatiu. En aquest cas, els valors d'inductància i el percentatge de variació respecte el buit són molt més elevats que en el cas anterior. Es pot observar que a 55 kHz la inductància varia de l'ordre del 70% respecte el valor en el buit a 0 mm. Com ja s'ha explicat en el treball i en l'annex B, les mesures a aquesta freqüència oscil·len molt degut a les incerteses dels elements que formen el sistema.

E.Mesures inductància bobina concèntrica sense condensador en paral·lel respecte a un feix de fibres

En aquest apartat de l'annex s'hi troben totes les mesures realitzades per la bobina concèntrica sense tenir el condensador en paral·lel. Aquestes mesures s'han fet en funció de la distància respecte a un feix de fibres a diferents freqüències per tal de veure'n la variació respecte la freqüència.

Distància (mm)	Inductància a 1kHz (mH)	% relació	Inductància a 10KHz (mH)	% relació	Inductància a 50KHz (mH)	% relació
buit	44,56	0	44,64	0	215,3	0
0	44,77	0,47	44,85	0,47	219,8	2,09
2,5	44,7	0,31	44,78	0,31	218,9	1,67
5	44,67	0,25	44,74	0,22	217,5	1,02
7,5	44,63	0,16	44,71	0,16	217,2	0,88
10	44,6	0,09	44,69	0,11	217	0,79
12,5	44,6	0,09	44,68	0,09	216,4	0,51
15	44,59	0,07	44,67	0,07	216,3	0,46
17,5	44,57	0,02	44,66	0,04	216,1	0,37
20	44,57	0,02	44,65	0,02	215,9	0,28
22,5	44,58	0,04	44,65	0,02	215,7	0,19
25	44,56	0,00	44,65	0,02	215,5	0,09

Figura E.1.- Taula de les mesures realitzades amb la bobina concèntrica a les freqüències de 1 kHz, 10 kHz i 50 kHz respecte al feix de fibres. Com en el cas de la bobina exterior en destaca l'augment de sensibilitat a mesura que s'augmenta la freqüència de mesura. A diferència del cas de la bobina concèntrica exterior, amb la bobina concèntrica s'obté més diferència respecte el valor mesurat en el buit.

Distància (mm)	Inductància a 52kHz (mH)	% relació	Inductància a 53kHz (mH)	% relació
buit	331	0	460	0
0	341	3,02	480	4,35
2,5	339	2,42	475	3,26
5	335,3	1,30	470	2,17
7,5	334,6	1,09	470	2,17
10	334	0,91	470	2,17
12,5	333,3	0,69	460	0,00
15	332,7	0,51	460	0,00
17,5	332,2	0,36	460	0,00
20	332	0,30	460	0,00
22,5	331,8	0,24	460	0,00
25	331,7	0,21	460	0,00

Figura E.2.- Taula de les mesures realitzades amb la bobina concèntrica a les freqüències de 52 kHz i 53 kHz respecte al feix de fibres. Com en el cas de la bobina exterior en destaca l'augment de sensibilitat a mesura que s'augmenta la freqüència de mesura. A diferència del cas de la bobina concèntrica exterior, amb la bobina concèntrica s'obté més diferència respecte el valor mesurat en el buit.

Distància (mm)	Inductància a 54kHz (mH)	% relació	Inductància a 55kHz (mH)	% relació
buit	760	0	2300	0
0	810	6,58	2910	26,52
2,5	800	5,26	2760	20,00
5	780	2,63	2550	10,87
7,5	780	2,63	2530	10,00
10	777	2,24	2460	6,96
12,5	775	1,97	2410	4,78
15	770	1,32	2380	3,48
17,5	760	0,00	2360	2,61
20	760	0,00	2340	1,74
22,5	760	0,00	2330	1,30
25	760	0,00	2320	0,87

Figura E.3.- Taula de les mesures realitzades amb la bobina concèntrica a les freqüències de 54 kHz i 55 kHz respecte al feix de fibres. Com en el cas de la bobina exterior en destaca l'augment de sensibilitat a mesura que s'augmenta la freqüència de mesura. A diferència del cas de la bobina concèntrica exterior, amb la bobina concèntrica s'obté més diferència respecte el valor mesurat en el buit.

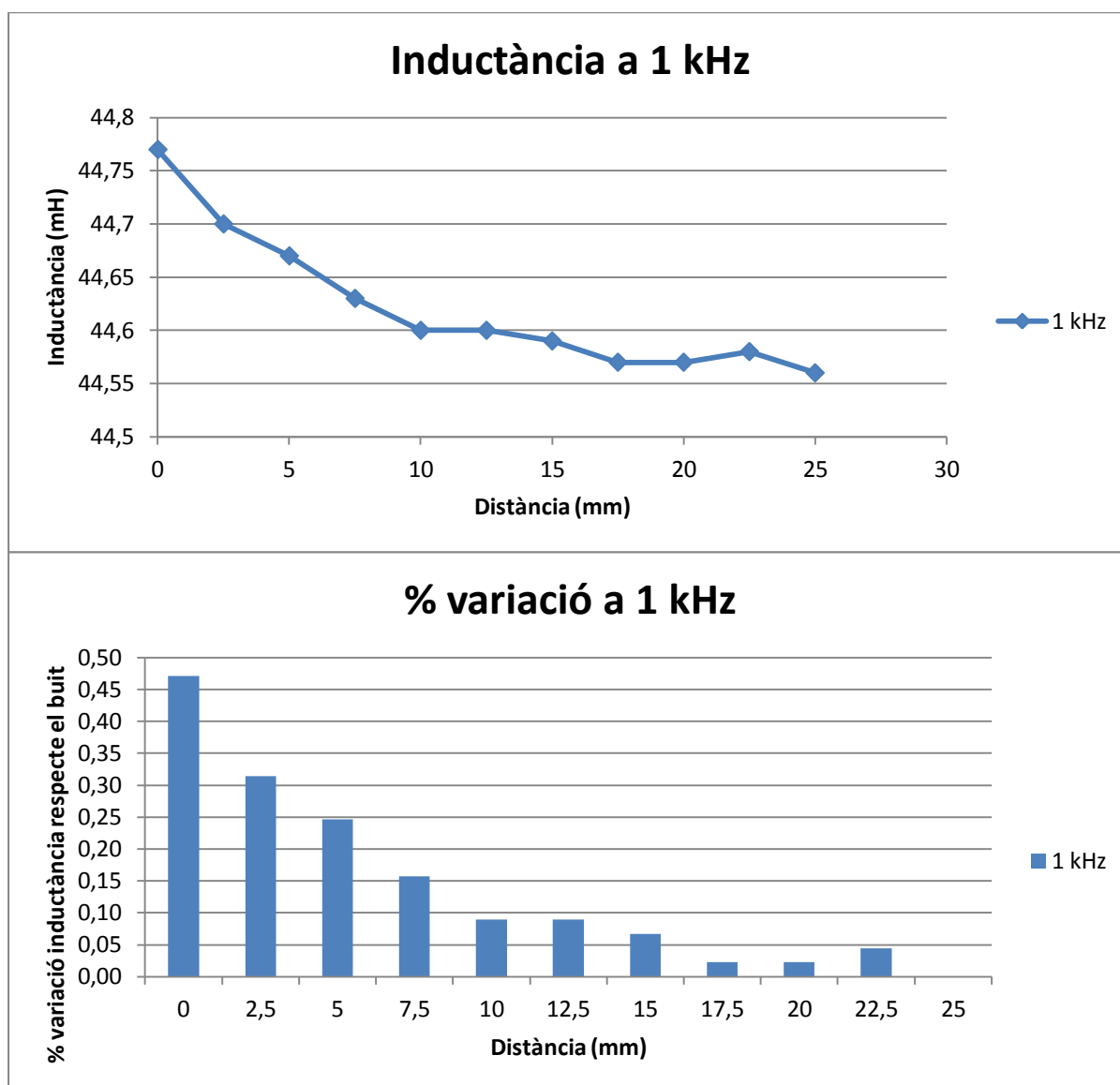


Figura E.4.- Gràfiques de la inductància mesurada a 1kHz i el seu percentatge de variació respecte el buit. Com es pot observar, ambdós casos segueixen un model exponencial d'exponent negatiu. En aquest cas, els valors d'inductància i el percentatge de variació respecte el buit són inferiors al cas del pla de fibres. Es pot observar que a 1 kHz la inductància varia de l'ordre del 0,47% respecte el valor en el buit a 0 mm.

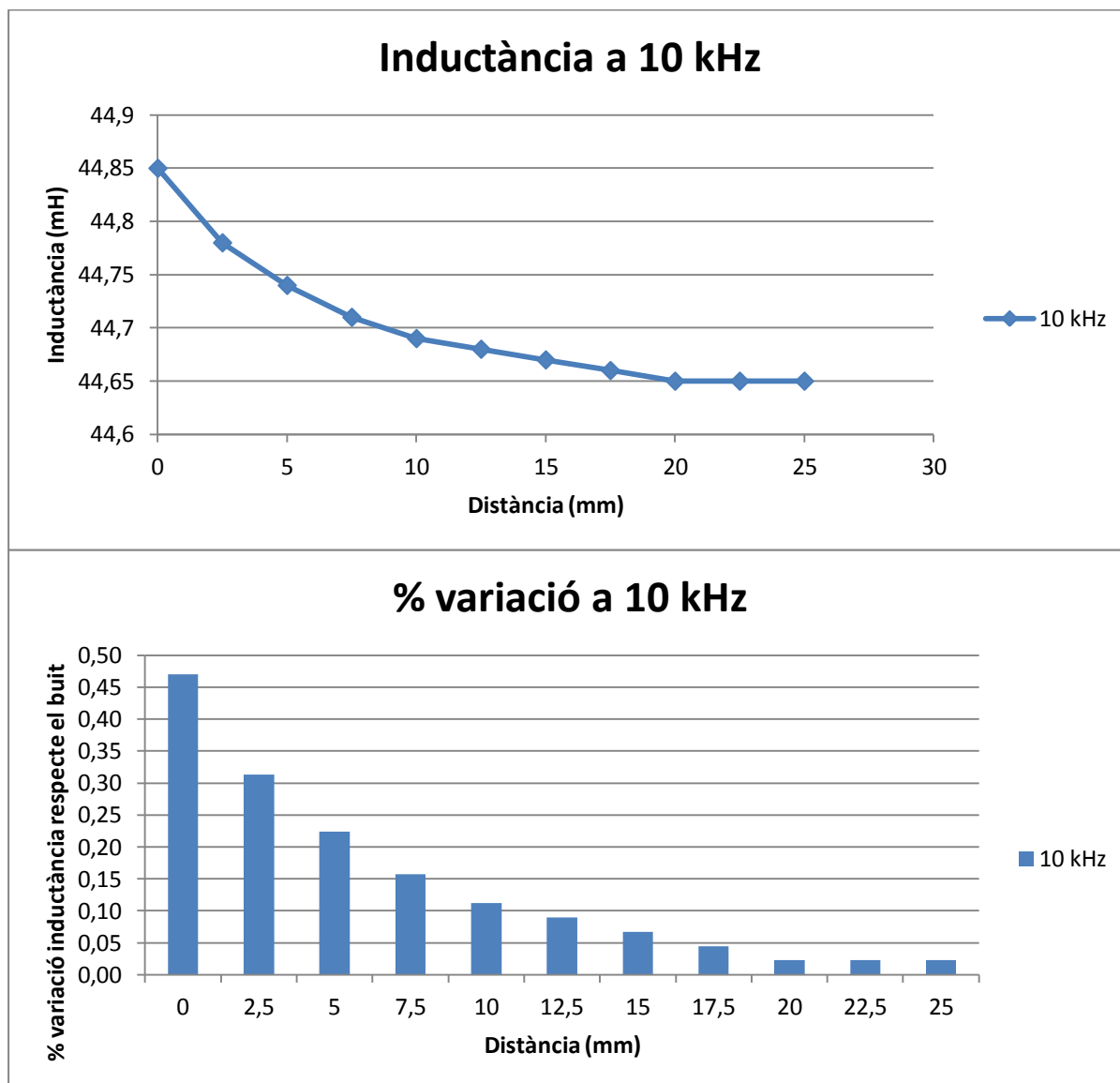


Figura E.5.- Gràfiques de la inductància mesurada a 10kHz i el seu percentatge de variació respecte el buit. Com es pot observar, ambdós casos segueixen un model exponencial d'exponent negatiu. En aquest cas, els valors d'inductància i el percentatge de variació respecte el buit són molt similars al cas de 1 kHz. Es pot observar que a 10 kHz la inductància varia de l'ordre del 0,47% respecte el valor en el buit a 0 mm.

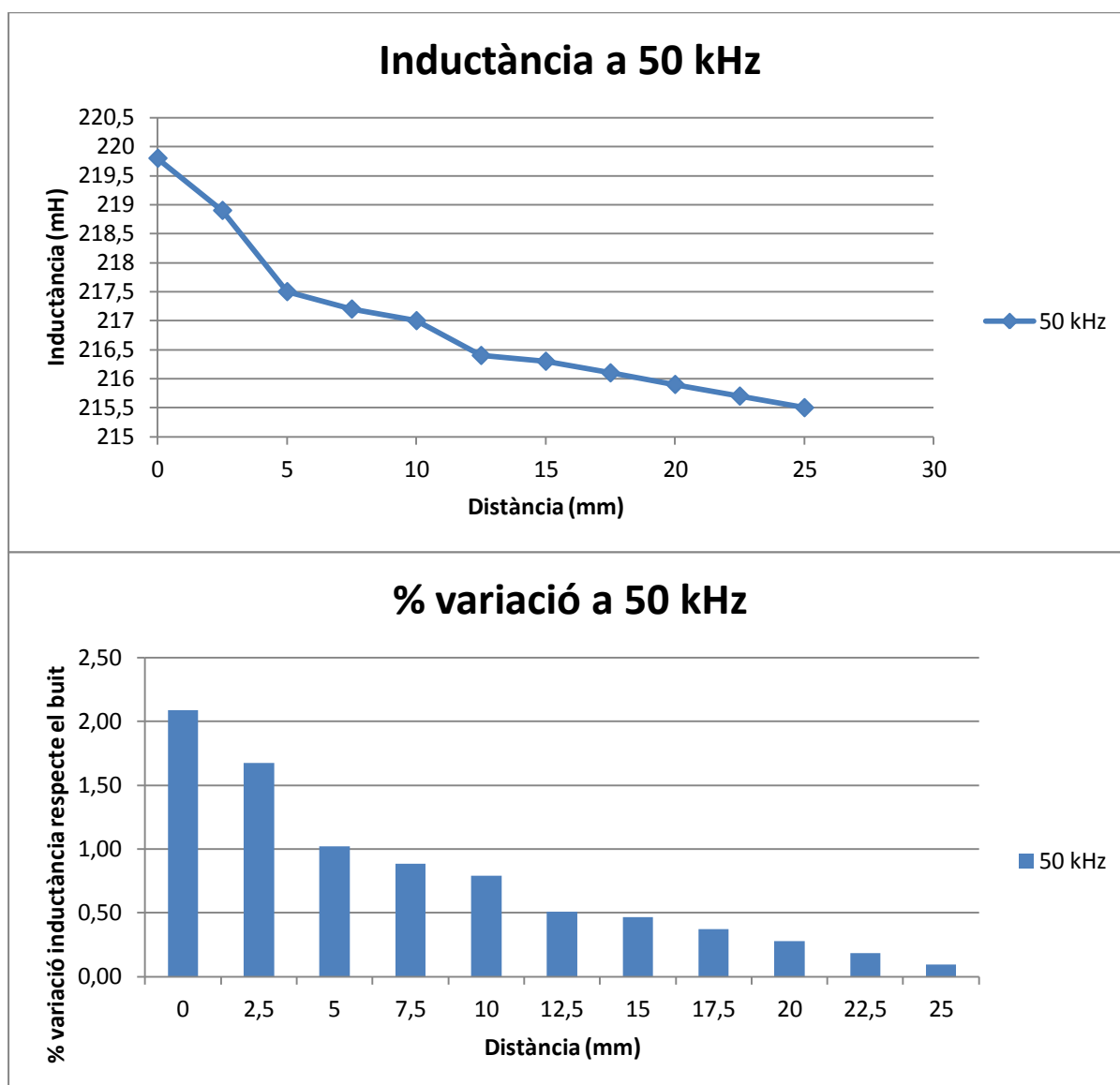


Figura E.6.- Gràfiques de la inductància mesurada a 50kHz i el seu percentatge de variació respecte el buit. Igual que en els casos anteriors, ambdós casos segueixen un model exponencial d'exponent negatiu. En aquest cas, els valors d'inductància i el percentatge de variació respecte el buit són superiors als casos anteriors. Es pot observar que a 50 kHz la inductància varia de l'ordre del 2,1% respecte el valor en el buit a 0 mm.

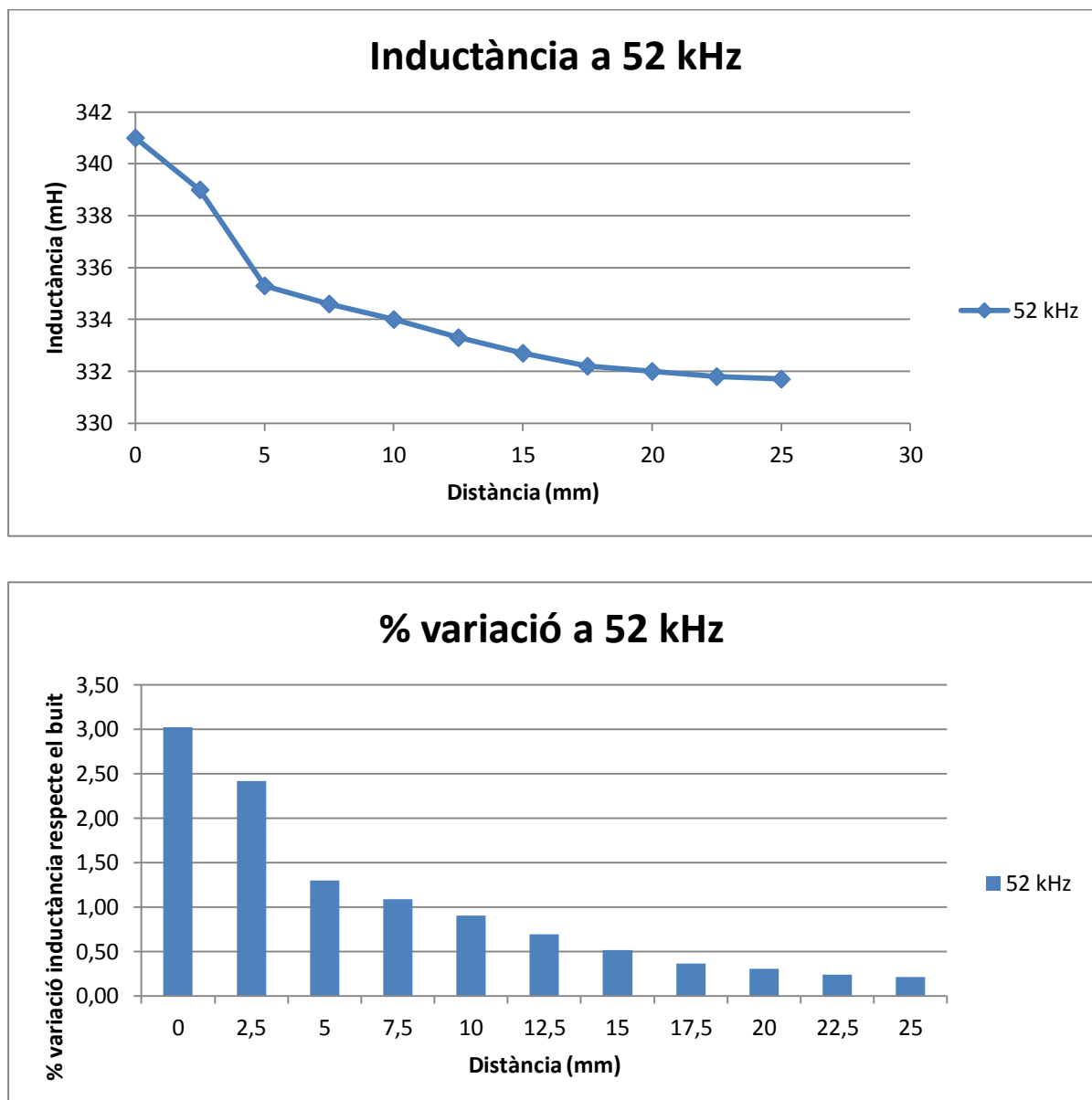


Figura E.7.- Gràfiques de la inductància mesurada a 52kHz i el seu percentatge de variació respecte el buit. De forma idèntica als casos anteriors, ambdues gràfiques segueixen un model exponencial d'exponent negatiu. En aquest cas, seguint la tendència, els valors d'inductància i el percentatge de variació respecte el buit són superiors als casos anteriors. Es pot observar que a 52 kHz la inductància varia de l'ordre del 3% respecte el valor en el buit a 0 mm.

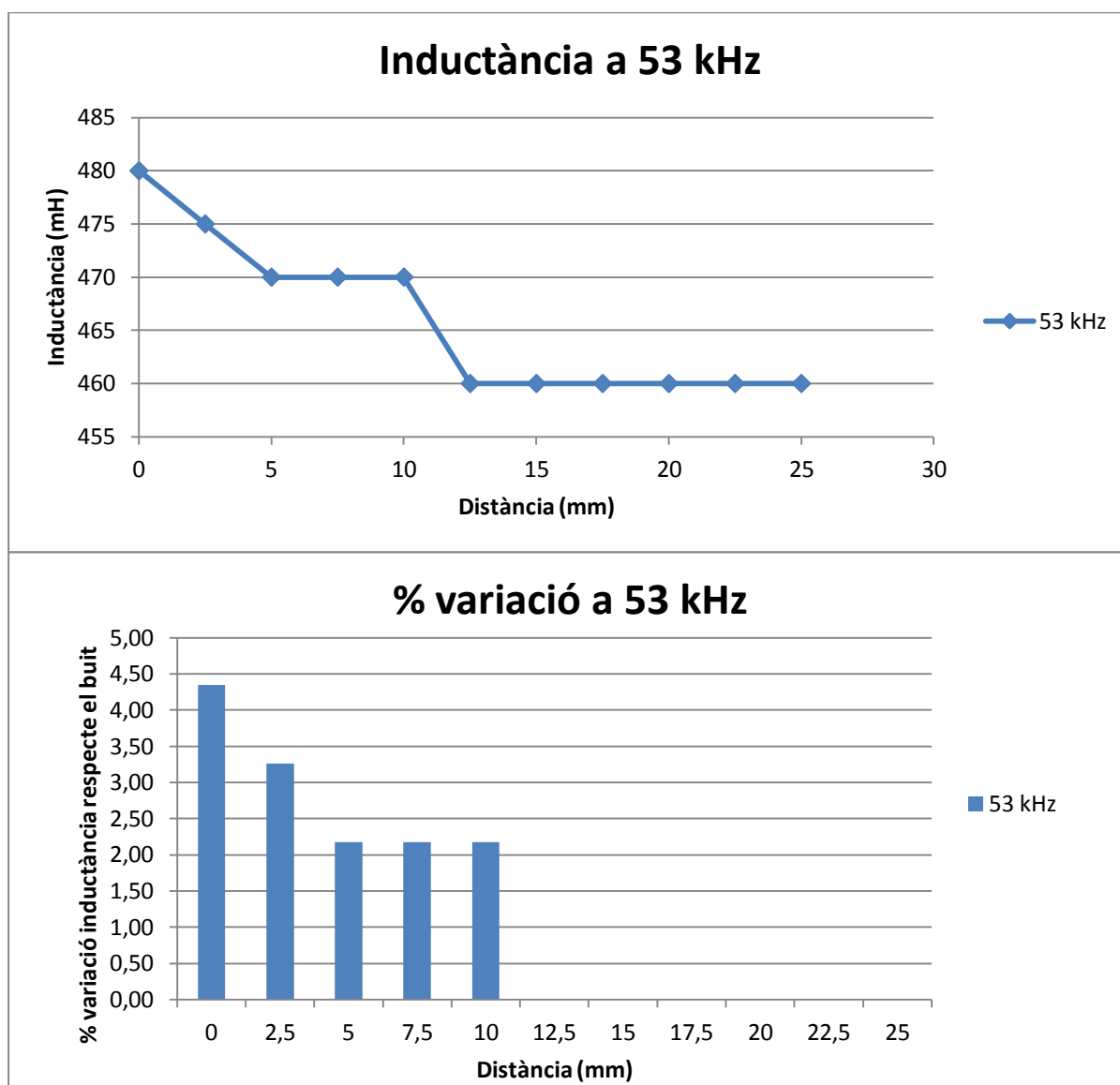


Figura E.8.- Gràfiques de la inductància mesurada a 53 kHz i el seu percentatge de variació respecte el buit. En aquest cas en particular, degut al canvi de xifres significatives de l'analitzador d'impedàncies no tenim la resolució òptima per veure'n la diferència i a partir de 10mm ja no es registra variació d'impedància. De totes maneres, es pot observar que a 53 kHz la inductància varia aproximadament un 4,4% respecte el valor en el buit a 0 mm.

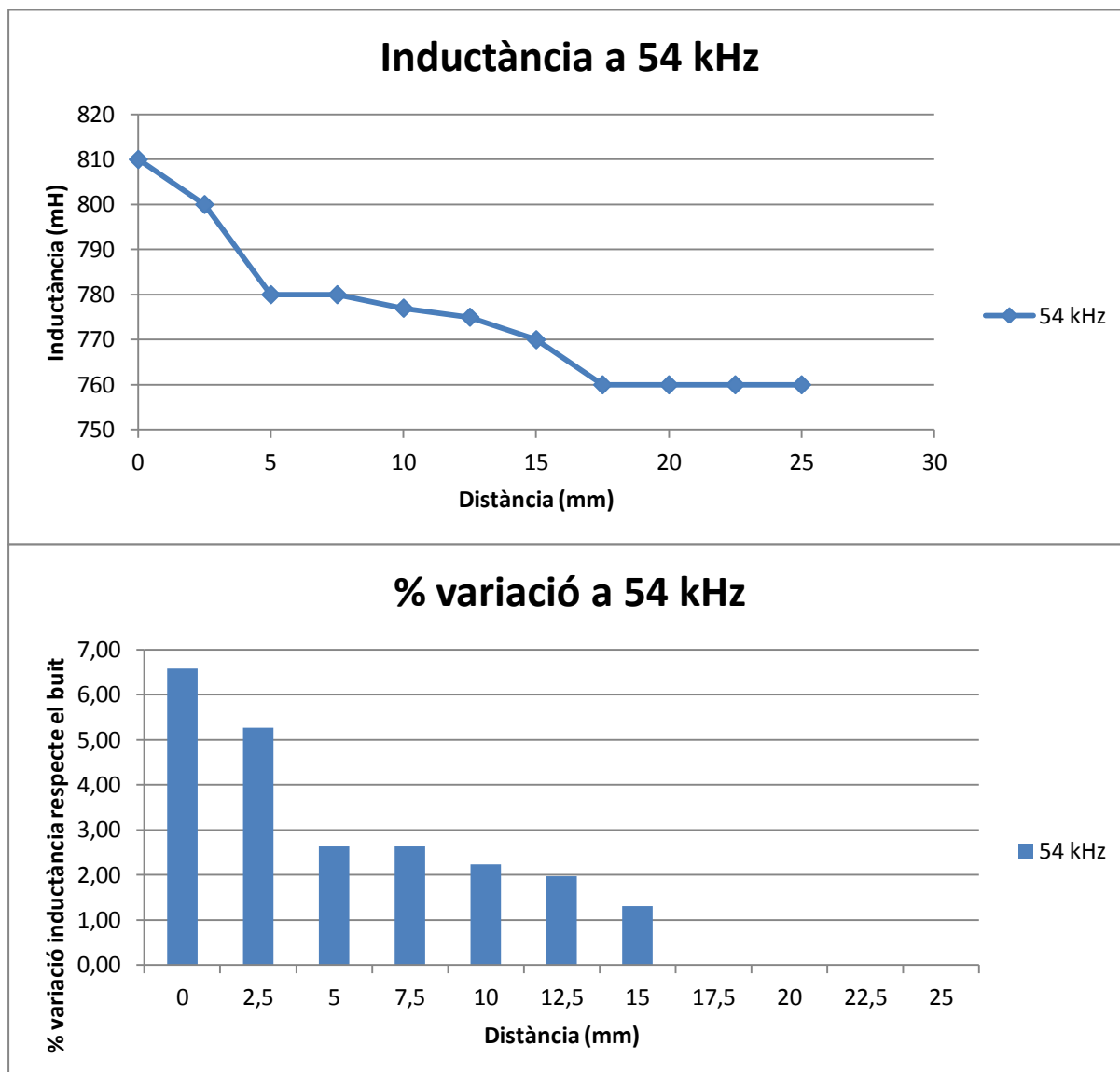


Figura E.9.- Gràfiques de la inductància mesurada a 54kHz i el seu percentatge de variació respecte el buit. De forma similar al casos anteriors, degut al canvi de xifres significatives de l'analitzador d'impedàncies no tenim la resolució òptima per veure'n la diferència i a partir de 15mm ja no es registra variació d'impedància. De totes maneres, es pot observar que a 54 kHz la inductància varia aproximadament un 6,5% respecte el valor en el buit a 0 mm.

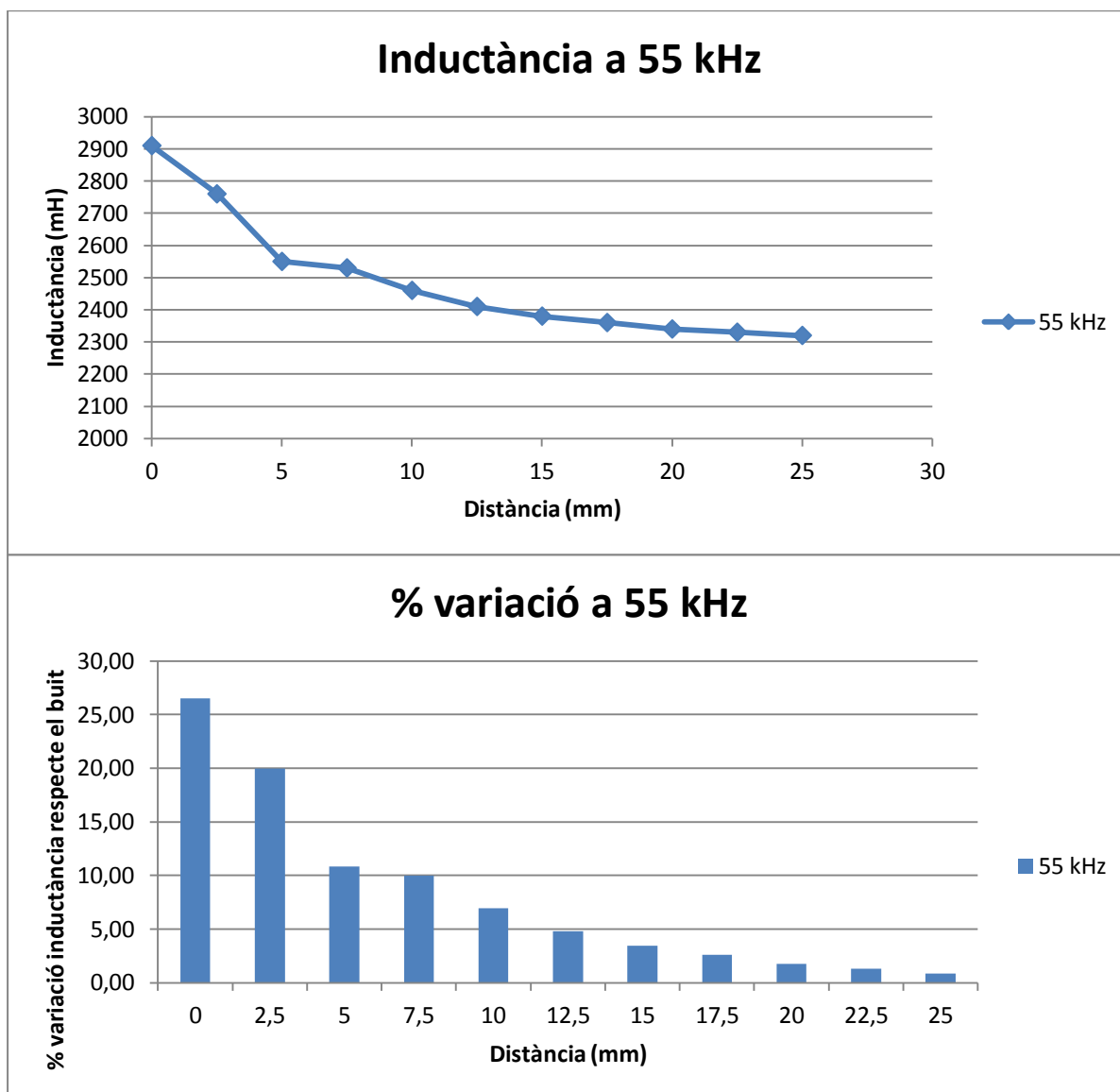


Figura E.10.- Gràfiques de la inductància mesurada a 55kHz i el seu percentatge de variació respecte el buit. Igual que a freqüències baixes, ambdós casos segueixen un model exponencial d'exponent negatiu. En aquest cas, els valors d'inductància i el percentatge de variació respecte el buit són molt superiors als casos anteriors. Es pot observar que a 55 kHz la inductància varia de l'ordre del 26% respecte el valor en el buit a 0 mm.

F. Mesures de les cares de les provetes de diferents concentracions de fibres

En aquest apartat de l'annex s'hi troben totes les mesures realitzades per la bobina concèntrica amb el condensador en paral·lel a les provetes de diferents concentracions de fibres. Les cares de cada proveta s'han dividit en 9 regions de mesura tal i com indica la imatge de la figura F.1.

1	2	3
4	5	6
7	8	9

Figura F.1.- Divisions de cada una de les cares. Cada costat de la divisió mesura el diàmetre de la bobina concèntrica.

Cara 1	Valor Inductància (mH)	% Relació amb buit
Buit	214,5	0
1	215,7	0,559
2	216,4	0,886
3	217,1	1,212
4	215,7	0,559
5	216	0,699
6	216,1	0,746
7	215,7	0,559
8	217,2	1,259
9	217	1,166

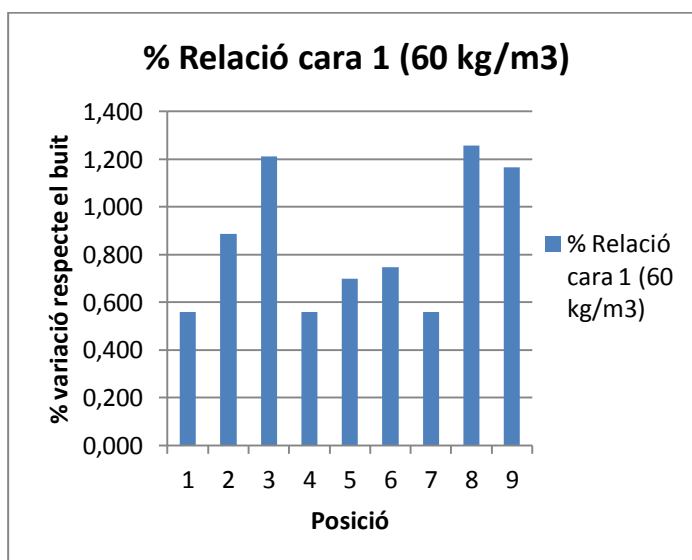


Figura F.2.- Resultats de les mesures en la cara 1 de la proveta de 60 kg/m³. Es pot observar que en les posicions 3, 8 i 9 s'hi registren els màxims.

Cara 2	Valor Inductància (mH)	% Relació amb buit
Buit	214,5	0
1	216	0,699
2	217,9	1,585
3	215,7	0,559
4	214,9	0,186
5	215,9	0,653
6	215,4	0,420
7	215,5	0,466
8	216,2	0,793
9	215,6	0,513

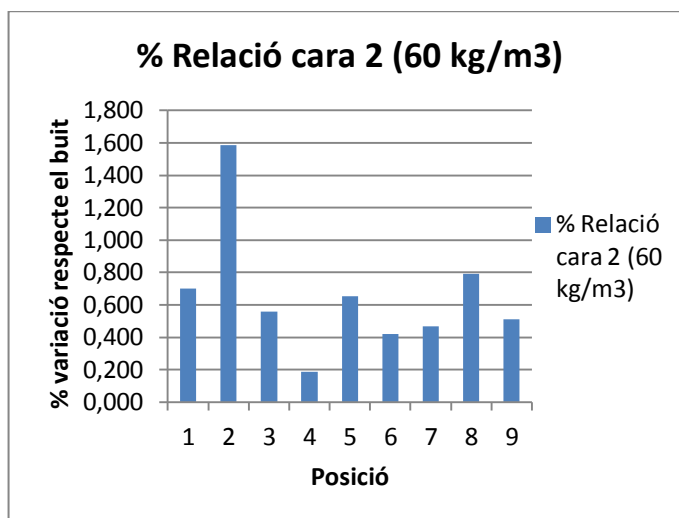


Figura F.3.- Resultats de les mesures en la cara 2 de la proveta de 60 kg/m³. Es pot observar que en la posició 2 s'hi registra el màxim.

Cara 3	Valor Inductància (mH)	% Relació amb buit
Buit	214,5	0
1	217	1,166
2	217,7	1,492
3	217,2	1,259
4	217,5	1,399
5	220,1	2,611
6	220,8	2,937
7	215,1	0,280
8	215,6	0,513
9	215,5	0,466

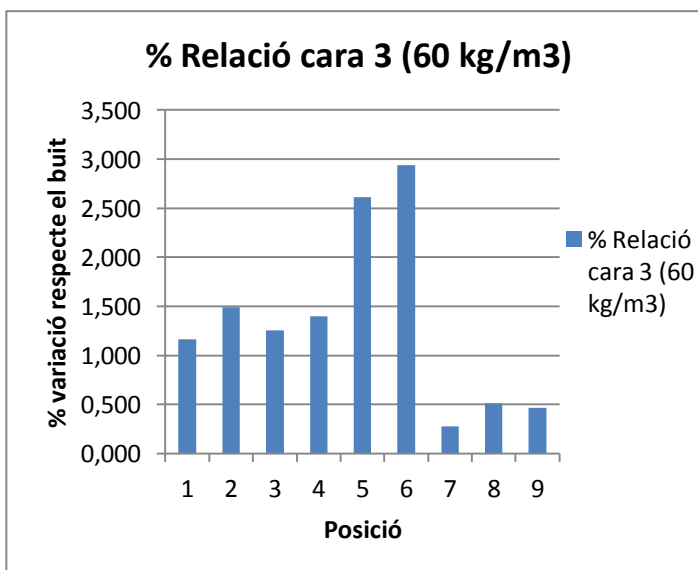


Figura F.4.- Resultats de les mesures en la cara 3 de la proveta de 60 kg/m³. Es pot observar que en les posicions 5 i 6 s'hi registren els màxims.

Cara 4	Valor inductància (mH)	% Relació amb buit
Buit	214,5	0
1	215,4	0,420
2	216,2	0,793
3	216,9	1,119
4	215,3	0,373
5	216,2	0,793
6	215,9	0,653
7	215,3	0,373
8	216,8	1,072
9	216,8	1,072

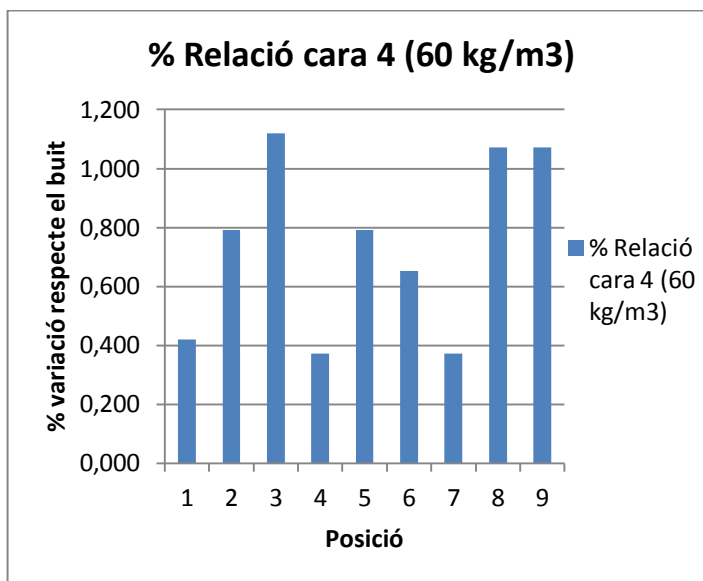


Figura F.5.- Resultats de les mesures en la cara 4 de la proveta de 60 kg/m³. Es pot observar que en les posicions 3,8 i 9 s'hi registren els màxims.

Cara 5	Valor Inductància (mH)	% Relació amb buit
Buit	214,5	0
1	215,8	0,606
2	217,3	1,305
3	216,2	0,793
4	215,1	0,280
5	215,4	0,420
6	215,6	0,513
7	215,1	0,280
8	216	0,699
9	215,9	0,653

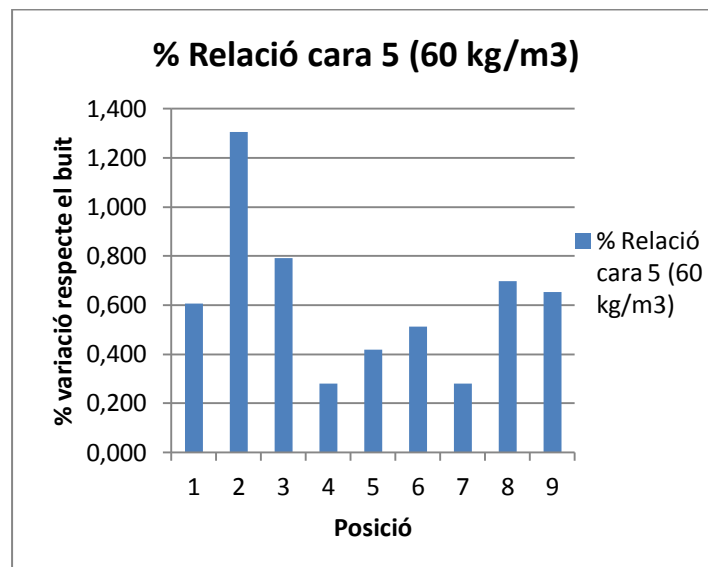


Figura F.6.- Resultats de les mesures en la cara 5 de la proveta de 60 kg/m³. Es pot observar que en la posició 1 s'hi registra el màxim.

Cara 6	Valor Inductància (mH)	% Relació amb buit
Buit	214,5	0
1	216,6	0,979
2	217,2	1,259
3	217	1,166
4	217,8	1,538
5	218,9	2,051
6	219,2	2,191
7	216,9	1,119
8	216,1	0,746
9	215,8	0,606

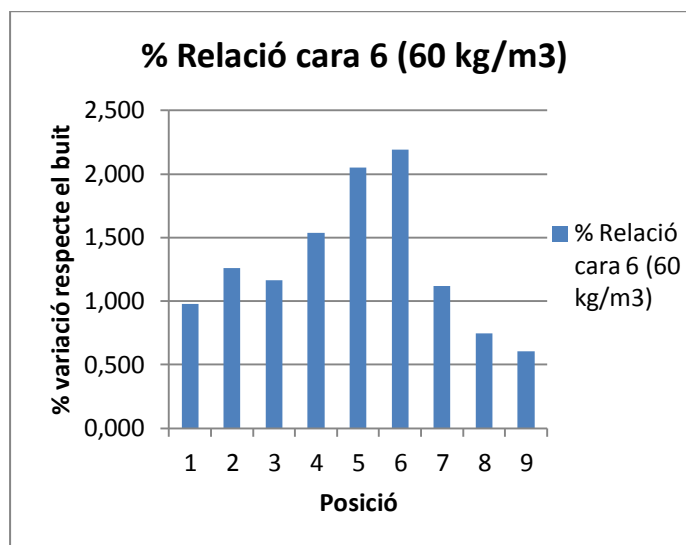


Figura F.7.- Resultats de les mesures en la cara 6 de la proveta de 60 kg/m³. Es pot observar que en les posicions 4, 5 i 6 s'hi registren els màxims superiors tots ells al 1.5%.

Cara 1	Valor Inductància (mH)	% Relació amb buit
Buit	214,8	0
1	215,7	0,419
2	215,9	0,512
3	215,9	0,512
4	215,7	0,419
5	216,8	0,931
6	216,8	0,931
7	216,1	0,605
8	216,3	0,698
9	216,8	0,931

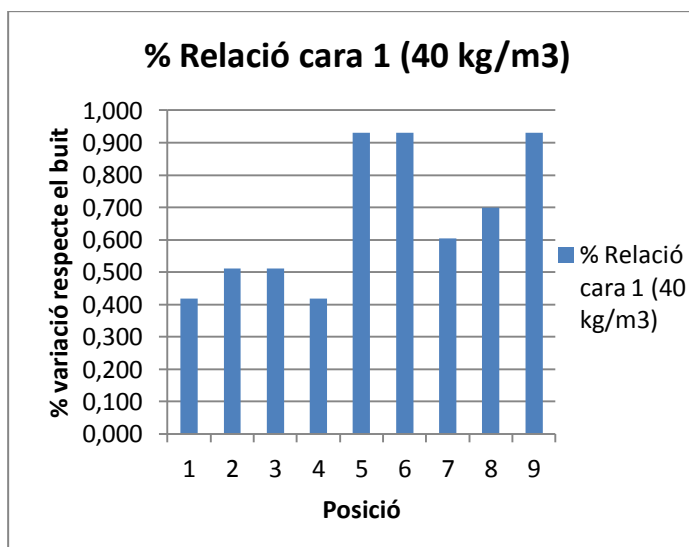


Figura F.8.- Resultats de les mesures en la cara 1 de la proveta de 40 kg/m³. Es pot observar que en les posicions 5, 6 i 9 s'hi registren els màxims superiors tots ells al 0.9%.

Cara 2	Valor inductància (mH)	% Relació amb buit
Buit	214,8	0
1	216,6	0,838
2	217,4	1,210
3	216,6	0,838
4	216,5	0,791
5	216,8	0,931
6	217	1,024
7	216,6	0,838
8	216,8	0,931
9	216,1	0,605

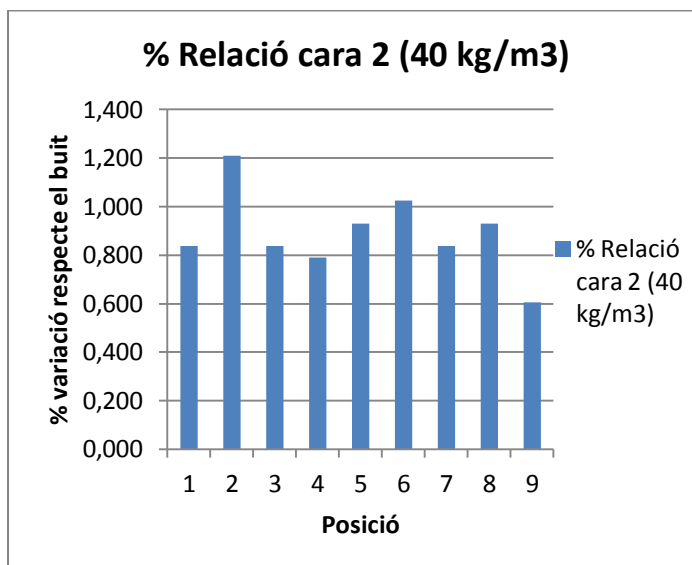


Figura F.9.- Resultats de les mesures en la cara 2 de la proveta de 40 kg/m³. Es pot observar que en la posició 2 s'hi registra el màxim. Cal destacar que en aquest cas, les mesures són bastant homogènies.

Cara 3	Valor Inductància (mH)	% Relació amb buit
Buit	214,8	0
1	215,1	0,140
2	216,2	0,652
3	216	0,559
4	215,1	0,140
5	215,6	0,372
6	215,5	0,326
7	215,1	0,140
8	215,4	0,279
9	215,8	0,466

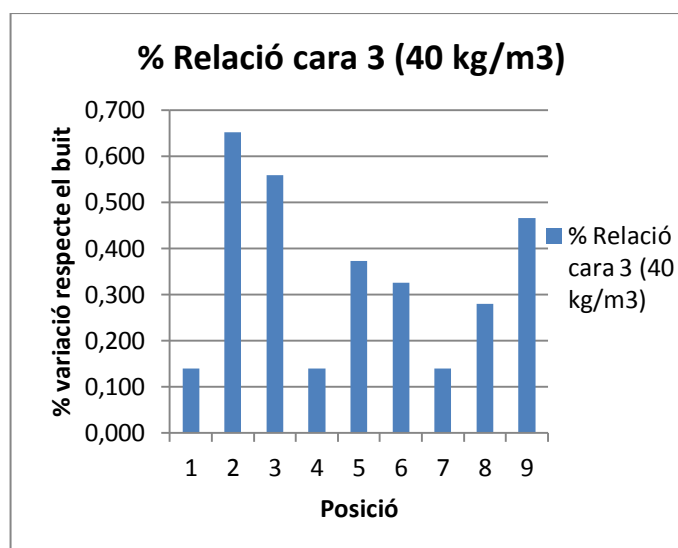


Figura F.10.- Resultats de les mesures en la cara 3 de la proveta de 40 kg/m³. Es pot observar que en les posicions 2, 3 i 9 s'hi registren els màxims.

Cara 4	Valor Inductància (mH)	% Relació amb buit
Buit	214,8	0
1	215,5	0,326
2	216,2	0,652
3	215,7	0,419
4	215,9	0,512
5	216,5	0,791
6	216,5	0,791
7	216,1	0,605
8	215,9	0,512
9	216,1	0,605

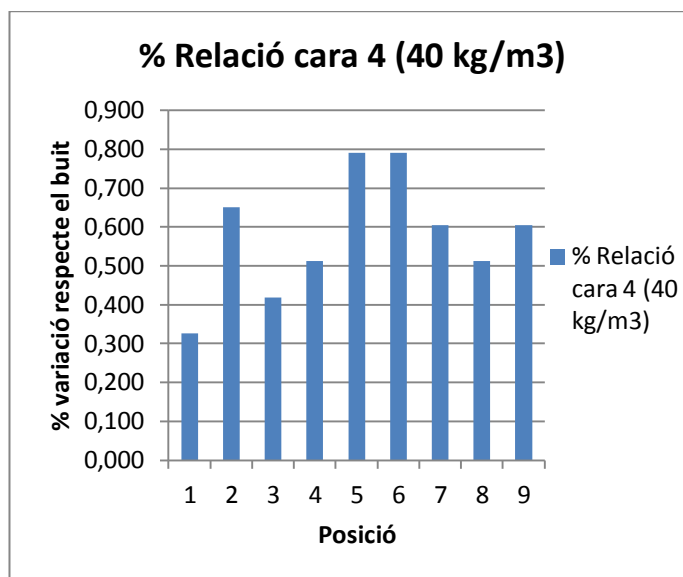


Figura F.11.- Resultats de les mesures en la cara 4 de la proveta de 40 kg/m³. Es pot observar que en les posicions 5 i 6 s'hi registren els màxims: 0,79%.

Cara 5	Valor Inductància (mH)	% Relació amb buit
Buit	214,8	0
1	216,1	0,605
2	217,1	1,071
3	215,9	0,512
4	216,3	0,698
5	216,5	0,791
6	216,8	0,931
7	216,2	0,652
8	215,9	0,512
9	216,3	0,698

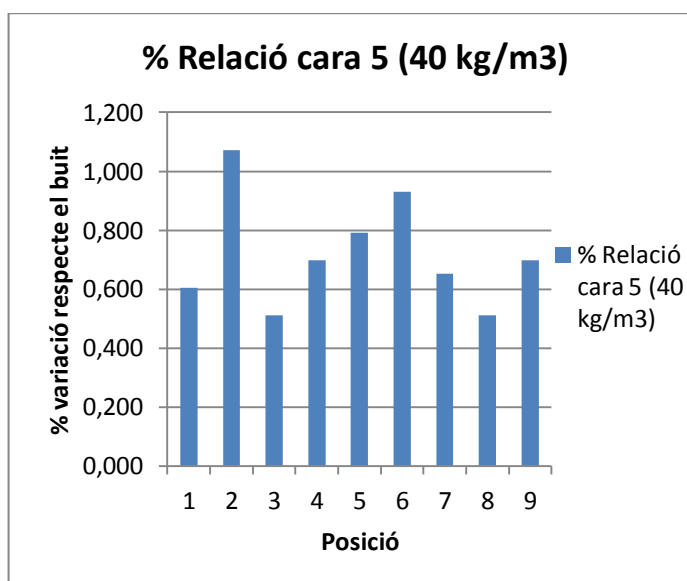


Figura F.12.- Resultats de les mesures en la cara 5 de la proveta de 40 kg/m³. Es pot observar que en les posicions 2 i 6 s'hi registren els màxims superiors al 0.9%.

Cara 6	Valor Inductància (mH)	% Relació amb buit
Buit	214,8	0
1	215,4	0,279
2	215,8	0,466
3	215,9	0,512
4	215,3	0,233
5	215,4	0,279
6	215,1	0,140
7	215,2	0,186
8	215,6	0,372
9	215,2	0,186

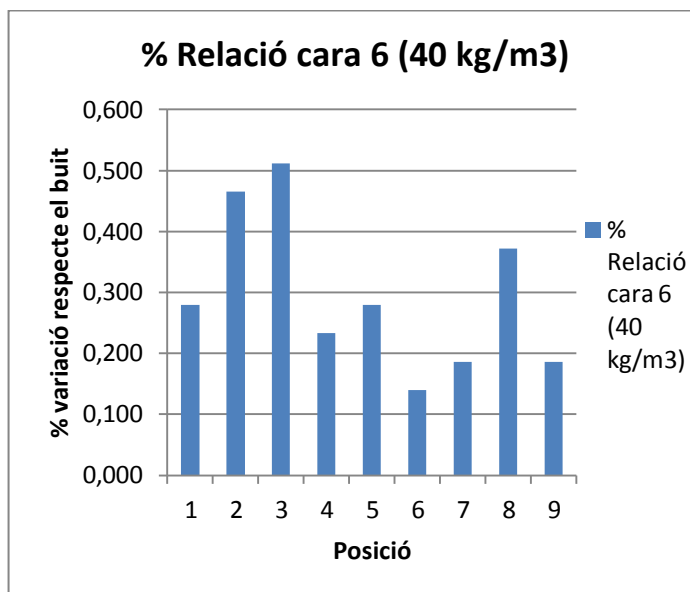


Figura F.13.- Resultats de les mesures en la cara 6 de la proveta de 40 kg/m³. Es pot observar que en les posicions 2, 3 i 8 s'hi registren els màxims superiors al 0.37%.

Cara 1	Valor Inductància (mH)	% Relació amb buit
Buit	214,5	0
1	214,6	0,047
2	215,7	0,559
3	215,5	0,466
4	214,8	0,140
5	215,1	0,280
6	215,1	0,280
7	215,1	0,280
8	216,1	0,746
9	215,2	0,326

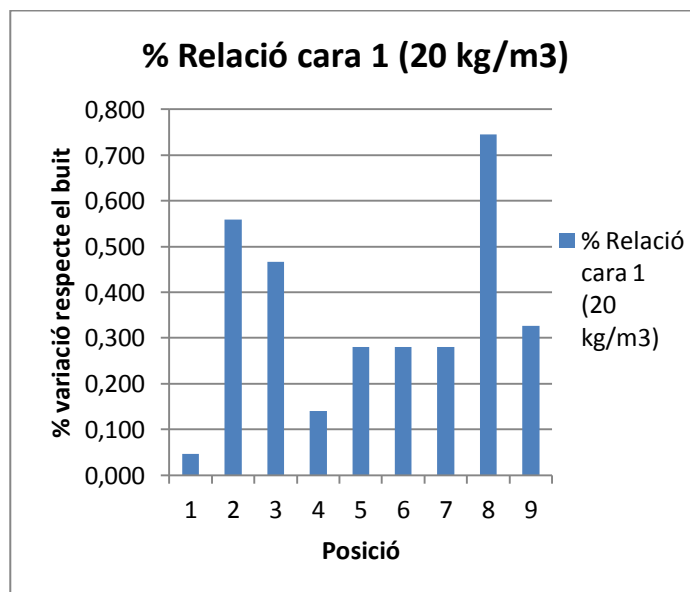


Figura F.14.- Resultats de les mesures en la cara 1 de la proveta de 20 kg/m³. Es pot observar que en la posició 8 s'hi registra el màxim de variació 0,746%.

Cara 2	Valor Inductància (mH)	% Relació amb buit
Buit	214,5	0
1	214,9	0,186
2	215	0,233
3	214,9	0,186
4	216,1	0,746
5	215,1	0,280
6	214,7	0,093
7	215,2	0,326
8	215,2	0,326
9	214,6	0,047

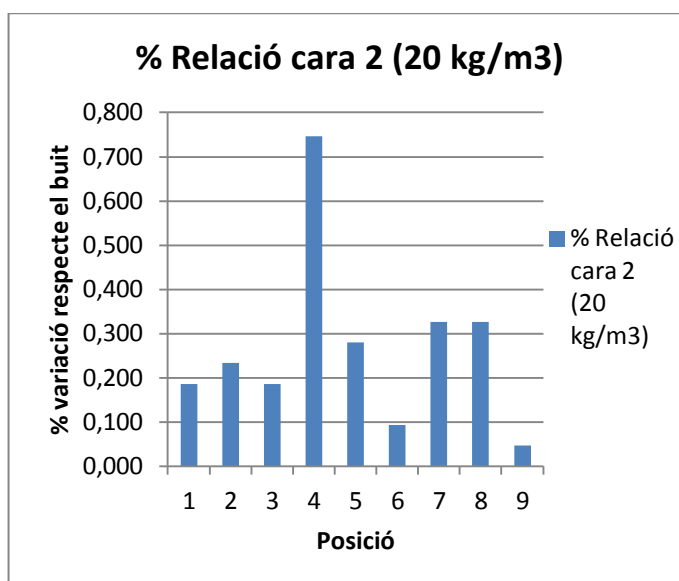


Figura F.15.- Resultats de les mesures en la cara 2 de la proveta de 20 kg/m³. Es pot observar que en la posició 4 s'hi registra el màxim de variació 0,746%.

Cara 3	Valor Inductància (mH)	% Relació amb buit
Buit	214,5	0
1	215	0,233
2	215,3	0,373
3	215,1	0,280
4	215,3	0,373
5	214,9	0,186
6	214,9	0,186
7	215,6	0,513
8	215,1	0,280
9	214,8	0,140

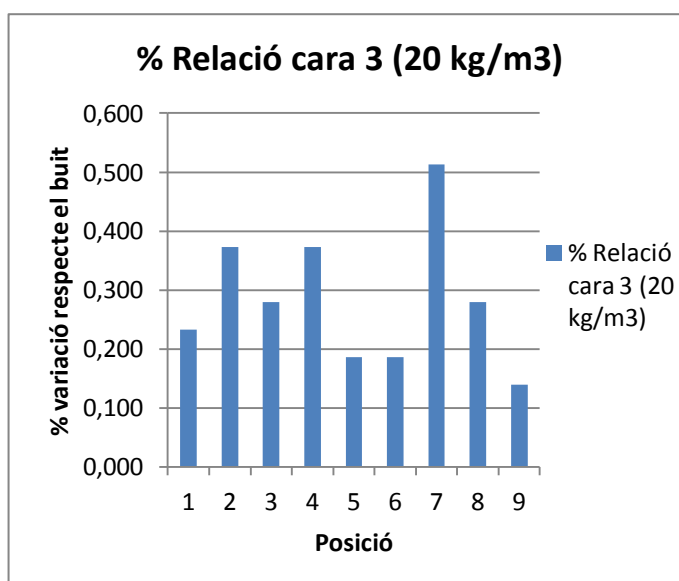


Figura F.16.- Resultats de les mesures en la cara 3 de la proveta de 20 kg/m³. Es pot observar que en la posició 7 s'hi registra el màxim de variació 0,513%.

Cara 4	Valor Inductància (mH)	% Relació amb buit
Buit	214,5	0
1	214,9	0,186
2	215,3	0,373
3	215,9	0,653
4	215,8	0,606
5	215,4	0,420
6	214,8	0,140
7	215,3	0,373
8	215,8	0,606
9	214,8	0,140

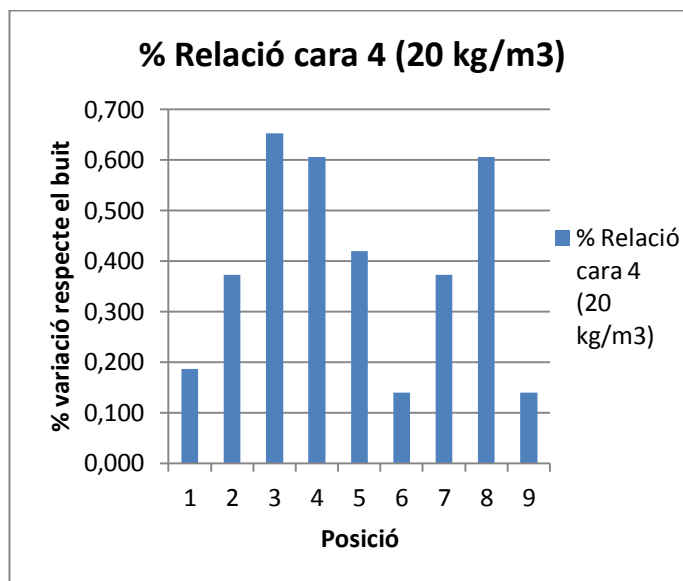


Figura F.17.- Resultats de les mesures en la cara 4 de la proveta de 20 kg/m³. Es pot observar que en les posicions 3, 4 i 8 s'hi registren els màxims de variació superiors tots ells al 0.6%.

Cara 5	Valor Inductància (mH)	% Relació amb buit
Buit	214,5	0
1	215,4	0,420
2	215,3	0,373
3	214,5	0,000
4	215,4	0,420
5	215,7	0,559
6	215,3	0,373
7	215,9	0,653
8	214,8	0,140
9	215,2	0,326

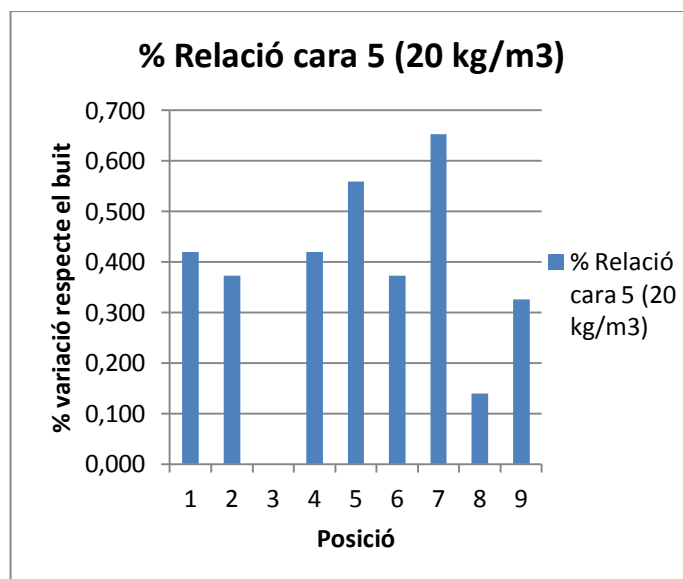


Figura F.18.- Resultats de les mesures en la cara 5 de la proveta de 20 kg/m³. Es pot observar que en les posicions 5 i 7 s'hi registren els màxims de variació superiors tots ells al 0.55%.

Cara 6	Valor Inductància (mH)	% Relació amb buit
Buit	214,5	0
1	215,3	0,373
2	215,1	0,280
3	215,6	0,513
4	215,8	0,606
5	215,1	0,280
6	215	0,233
7	215,3	0,373
8	214,9	0,186
9	214,6	0,047

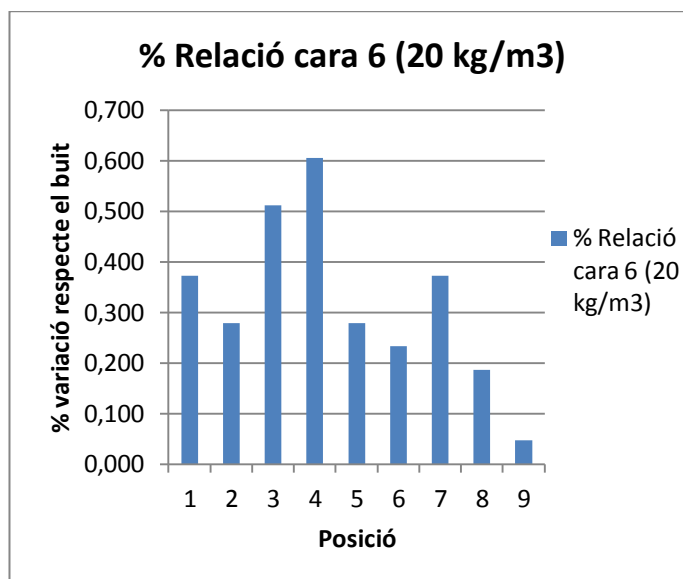


Figura F.19.- Resultats de les mesures en la cara 6 de la proveta de 20 kg/m³. Es pot observar que en les posicions 3 i 4 s'hi registren els màxims de variació superiors tots ells al 0.5%.

G. Imatges i fotografies del sistema de mesura i les proves realitzades

En aquest darrer apartat de l'annex hi ha algunes fotografies que s'han pres dels aparells de mesura, de la bobina concèntrica i algunes instantànies preses en moments en que es realitzaven les mesures.



Figura G.1.- Bobinadora que s'ha utilitzat per fer les voltes a les dues bobines



Figura G.2.- Detall de les dues bobines per separat. A l'esquerra s'observa la bobina exterior i a la dreta la bobina interior recoberta de polietilè expandit

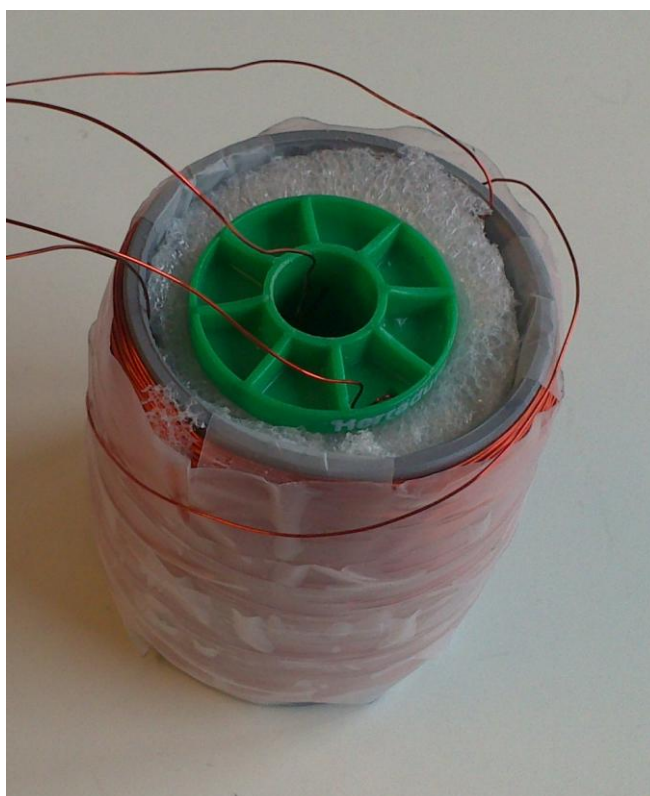


Figura G.3.- Bobina concèntrica un cop construïda i encaixada

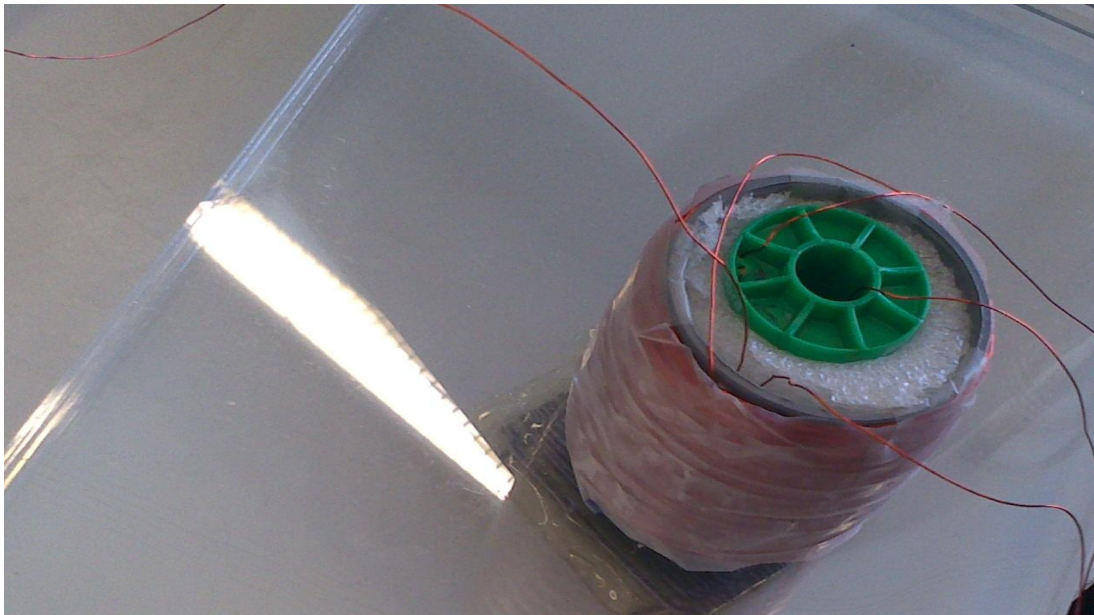


Figura G.4.- Detall d'una de les simulacions a diferents distàncies del pla de fibres. A la imatge s'observa el pla de fibres sota unes làmines transparents de ABS que permeten fer les diferents distàncies de la prova. Finalment, sobre les làmines es situa la bobina concèntrica per poder fer la mesura corresponent.



Figura G.5.- Vista perpendicular de la imatge de la figura G.4.

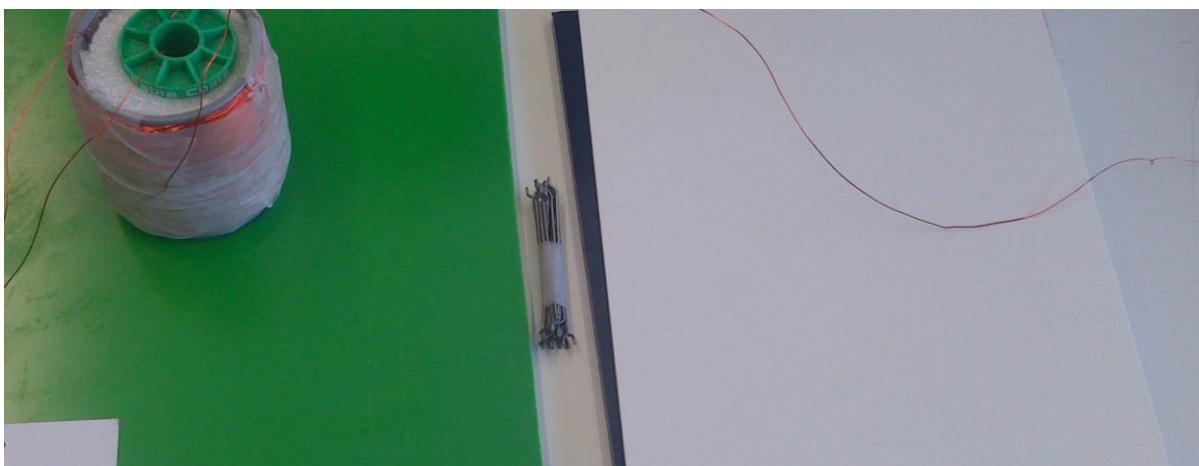


Figura G.6.- Disposició del feix de fibres per a la realització del test en que es mesura la inductància a diferents distàncies. Com es pot veure, es disposa el feix de fibres al centre i per tal de fer les mesures a la seva superfície, es col·loquen làmines als dos costats del feix per aconseguir tenir la bobina recta i a 0mm del feix de fibres.

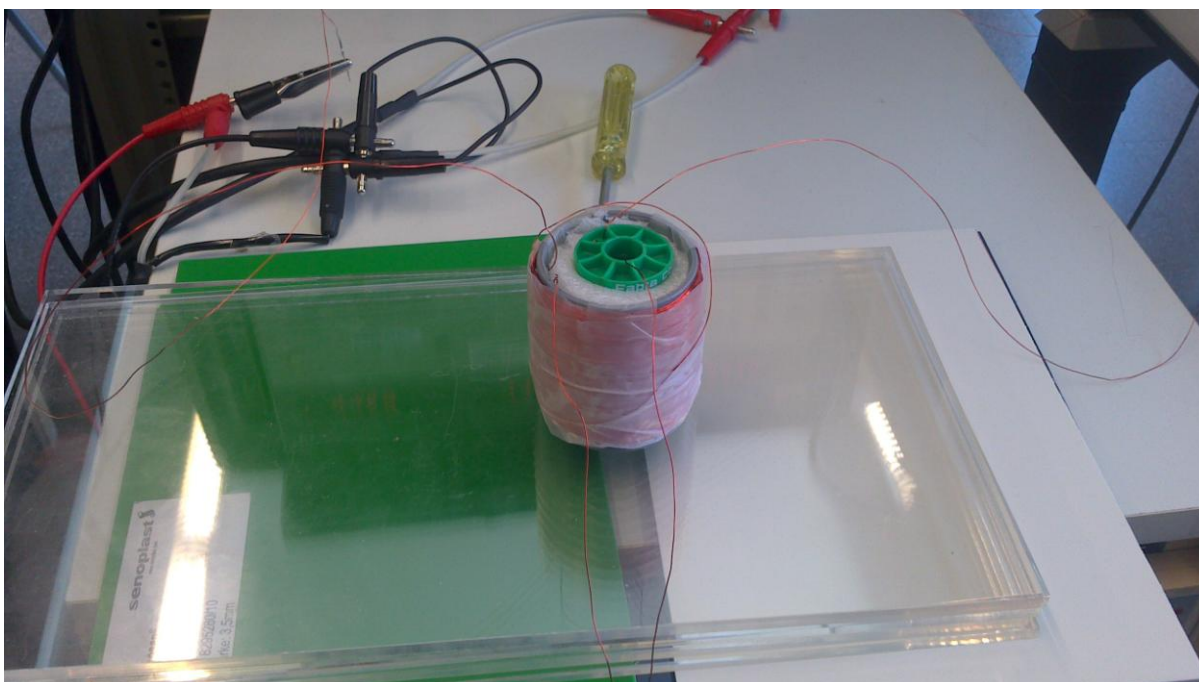


Figura G.7.- Detall d'una de les simulacions a diferents distàncies del feix de fibres. A la imatge s'observa que partint de la disposició de la figura G.6, es col·loquen unes làmines transparents de ABS que permeten fer les diferents distàncies de la prova.

Finalment, sobre les làmines es situa la bobina concèntrica per poder fer la mesura corresponent.



Figura G.8.- Detall d'una de les simulacions de la llosa que conté fibres d'acer convencional al carboni. A la imatge s'observa la bobina concèntrica mesurant la inductància en el punt 18.

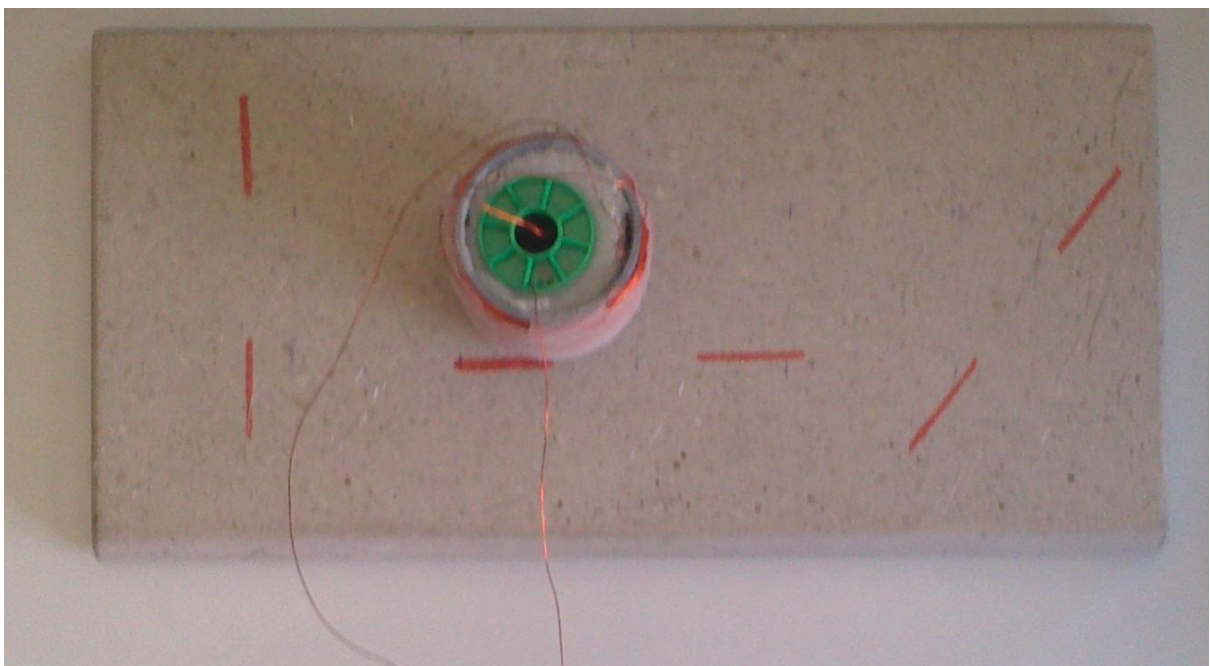


Figura G.9.- Detall d'una de les simulacions de la llosa que conté fibres d'acer d'alta resistència mecànica. A la imatge s'observa la bobina concèntrica mesurant la inductància en el punt 9.



Figura G.10.- Detall d'una de les simulacions de proveta que conté una dosificació de 40 kg/m^3 de fibres. A la imatge s'observa la bobina concèntrica mesurant la inductància en el punt 5 en la cara 3.



Figura G.11.- Detall d'una de les simulacions de proveta que conté una dosificació de 20 kg/m^3 de fibres. A la imatge s'observa la bobina concèntrica mesurant la inductància en el punt 5 en la cara 3.



Figura G.12.- Imatge del condensador col·locat en paral·lel a la bobina en els extrems del fil de coure. Com es pot observar aquest condensador ceràmic és de 5.6 nF

H.Taula resum de diferents sistemes proposats

	Solenoide clàssic	Solenoide pla LDC1000 EVM	Doble bobina mateixa direcció embobinat	Solenoide bobina horitzontal en forma U	Doble bobina direcció oposada embobinat
Profunditat	+	+	+	+	++
Sensibilitat	++	++	+	++	++
Repetibilitat	++	+++	++	++	++
Exactitud	+	++	+	++	+++
Processat senyal	++	+++	++	++	++
Fiabilitat	++	++	++	++	+++
Facilitat construcció	+++	++	+++	+++	+++

	Bobina concèntrica dreta	Bobina concèntrica tombada
Profunditat	++	++
Sensibilitat	++	++
Repetibilitat	++	+
Exactitud	+++	++
Processat senyal	++	++
Fiabilitat	+++	++
Facilitat construcció	++	++

Llegenda: +++ Molt bo
 ++ Regular
 + Deficient

Figura H.1.- Taula resum de les diferents possibilitats de disseny i muntatge de la bobina que es van fer abans de decidir-se finalment per la construcció de la bobina concèntrica

7 Bibliografia

1. Ferrara, L; Faifer,M; Toscani,S. A magnetic method for non destructive monitoring of fiber dispersion and orientation in steel fiber reinforced cementitious composites. *Materials and Structures* (2012) 45:575-589.
2. Agilent Technologies, INC. Agilent Impedance Measurement Handbook [on line], pàgines 1-16. 2014. [Consulta: 30 abril 2014]. Disponible a: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5950-3000.pdf>>.
3. Mark Willcox and George Downes. *A brief description of NDT techniques*, pp. 17-22.
4. Universidad Tecnologica Nacional. Departamento de electrónica. Cátedra de Tecnologia Electrónica. *Inductores con núcleo de aire*. Ciudad Mendoza, Facultad Regional Mendoza, 2013.
5. Texas Instruments. LDC1000EVM. EVM Quick Start Guide [on line], pàgines 1-2. 2013. [Consulta: novembre 2013]. Disponible a: <<http://www.ti.com/tool/ldc1000evm>>
6. Agilent Technologies, INC. Agilent 4263B LCR Meter Operation Manual [on line], pàgines 231-236. 2009. [Consulta: 20 abril 2014]. Disponible a: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/4263-90050.pdf>>.
7. Tipler,P; Mosca,G. *Física para la ciencia y tecnología*. Vol 2. 3a edició. Editorial Reverte 1993.
8. García-Martín,J; Gómez-Gil, J; Vázquez-Sánchez, E. *Non-Destructive Techniques Based on Eddy Current Testing*, review, *Sensors* 2011, 11, 2525-2565; doi:10.3390/s110302525
9. Brosa-Ciércoles, Eric. *Magnetic validation system for steel fiber reinforced concrete*. Projecte Final de Carrera, Universitat Politècnica de Catalunya 2013.