

CONSOLIDATED VERSION

VERSION CONSOLIDÉE



Magnetic materials –

Part 15: Methods for the determination of the relative magnetic permeability of feebly magnetic materials

Matériaux magnétiques –

Partie 15: Méthodes de détermination de la perméabilité magnétique relative des matériaux faiblement magnétiques



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2016 IEC, Geneva, Switzerland

All rights reserved. Unless otherwise specified, no part of this publication may be reproduced or utilized in any form or by any means, electronic or mechanical, including photocopying and microfilm, without permission in writing from either IEC or IEC's member National Committee in the country of the requester. If you have any questions about IEC copyright or have an enquiry about obtaining additional rights to this publication, please contact the address below or your local IEC member National Committee for further information.

Droits de reproduction réservés. Sauf indication contraire, aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou mécanique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'IEC ou du Comité national de l'IEC du pays du demandeur. Si vous avez des questions sur le copyright de l'IEC ou si vous désirez obtenir des droits supplémentaires sur cette publication, utilisez les coordonnées ci-après ou contactez le Comité national de l'IEC de votre pays de résidence.

IEC Central Office
3, rue de Varembe
CH-1211 Geneva 20
Switzerland

Tel.: +41 22 919 02 11
Fax: +41 22 919 03 00
info@iec.ch
www.iec.ch

About the IEC

The International Electrotechnical Commission (IEC) is the leading global organization that prepares and publishes International Standards for all electrical, electronic and related technologies.

About IEC publications

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC. Please make sure that you have the latest edition, a corrigenda or an amendment might have been published.

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

The stand-alone application for consulting the entire bibliographical information on IEC International Standards, Technical Specifications, Technical Reports and other documents. Available for PC, Mac OS, Android Tablets and iPad.

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

The advanced search enables to find IEC publications by a variety of criteria (reference number, text, technical committee,...). It also gives information on projects, replaced and withdrawn publications.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Stay up to date on all new IEC publications. Just Published details all new publications released. Available online and also once a month by email.

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 15 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

65 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

IEC Customer Service Centre - webstore.iec.ch/csc

If you wish to give us your feedback on this publication or need further assistance, please contact the Customer Service Centre: csc@iec.ch.

A propos de l'IEC

La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est la première organisation mondiale qui élabore et publie des Normes internationales pour tout ce qui a trait à l'électricité, à l'électronique et aux technologies apparentées.

A propos des publications IEC

Le contenu technique des publications IEC est constamment revu. Veuillez vous assurer que vous possédez l'édition la plus récente, un corrigendum ou amendement peut avoir été publié.

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

Application autonome pour consulter tous les renseignements bibliographiques sur les Normes internationales, Spécifications techniques, Rapports techniques et autres documents de l'IEC. Disponible pour PC, Mac OS, tablettes Android et iPad.

Recherche de publications IEC - www.iec.ch/searchpub

La recherche avancée permet de trouver des publications IEC en utilisant différents critères (numéro de référence, texte, comité d'études,...). Elle donne aussi des informations sur les projets et les publications remplacées ou retirées.

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

Restez informé sur les nouvelles publications IEC. Just Published détaille les nouvelles publications parues. Disponible en ligne et aussi une fois par mois par email.

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 15 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

65 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

Si vous désirez nous donner des commentaires sur cette publication ou si vous avez des questions contactez-nous: csc@iec.ch.

CONSOLIDATED VERSION

VERSION CONSOLIDÉE



Magnetic materials –

Part 15: Methods for the determination of the relative magnetic permeability of feebly magnetic materials

Matériaux magnétiques –

Partie 15: Méthodes de détermination de la perméabilité magnétique relative des matériaux faiblement magnétiques

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 17.220.01; 29.030

ISBN 978-2-8322-3688-8

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.

Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-15:2012+AMD1:2016 CSV

REDLINE VERSION

VERSION REDLINE



Magnetic materials –

Part 15: Methods for the determination of the relative magnetic permeability of feebly magnetic materials

Matériaux magnétiques –

Partie 15: Méthodes de détermination de la perméabilité magnétique relative des matériaux faiblement magnétiques

CONTENTS

FOREWORD	3
INTRODUCTION	5
1 Scope	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions	7
4 Solenoid and magnetic moment method	7
4.1 General	7
4.2 Principle	7
4.3 Apparatus	9
4.4 Test specimen for the solenoid method	12
4.5 Procedure	13
4.6 Calculation	15
4.7 Uncertainty	16
5 Magnetic balance method	16
5.1 Principle	16
5.2 Disc inserts and reference materials	17
5.3 Test specimen	17
5.4 Procedure	18
5.5 Evaluation of the relative magnetic permeability	18
5.6 Uncertainty	18
6 Permeability meter method	18
6.1 Principle	18
6.2 Reference specimens and materials	19
6.3 Test specimen	20
6.4 Procedure	20
6.5 Uncertainty	20
7 Test report	20
Annex A (informative) Correction for self-demagnetization	21
Bibliography	23
Figure 1 – Circuit diagram for the solenoid method with withdrawal of test specimen	8
Figure 2 – Coil system for the determination of the magnetic dipole moment	11
Figure 3 – Magnetic balance: side view	17
Figure 4 – Schematic of the permeability meter arrangement and magnetic field distribution without and with test specimen	19
Figure 5 – Circuit diagram for the solenoid method with reversing of magnetizing current	9
Table 1 – Relative magnetic permeability ranges for the methods described	6
Table 2 – Cylindrical sample with a 1:1 aspect ratio	11
Table 3 – Circular cross section rod with an aspect ratio of 10:1	12

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MAGNETIC MATERIALS –

Part 15: Methods for the determination of the relative magnetic permeability of feebly magnetic materials

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as “IEC Publication(s)”). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

DISCLAIMER

This Consolidated version is not an official IEC Standard and has been prepared for user convenience. Only the current versions of the standard and its amendment(s) are to be considered the official documents.

This Consolidated version of IEC 60404-15 bears the edition number 1.1. It consists of the first edition (2012-09) [documents 68/442/FDIS and 68/443/RVD] and its amendment 1 (2016-12) [documents 68/531/CDV and 68/544/RVC]. The technical content is identical to the base edition and its amendment.

In this Redline version, a vertical line in the margin shows where the technical content is modified by amendment 1. Additions are in green text, deletions are in strikethrough red text. A separate Final version with all changes accepted is available in this publication.

International Standard IEC 60404-15 has been prepared by IEC technical committee 68: Magnetic alloys and steels.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

A list of all the parts in the IEC 60404 series, under the general title *Magnetic materials*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of the base publication and its amendment will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

IMPORTANT – The 'colour inside' logo on the cover page of this publication indicates that it contains colours which are considered to be useful for the correct understanding of its contents. Users should therefore print this document using a colour printer.

INTRODUCTION

The determination of the relative magnetic permeability of feebly magnetic materials is often required to assess their effect on the ambient magnetic field. Typical feebly magnetic materials are austenitic stainless steels and "non-magnetic" brass.

The relative magnetic permeability of some of these materials can vary significantly with the applied magnetic field strength. In the majority of cases, these materials find application in the ambient earth's magnetic field. This field in Europe is 35 A/m to 40 A/m, in the far East, it is 25 A/m to 35 A/m and in North America, it is 25 A/m to 35 A/m. However, at present, methods of measurement are not available to determine the relative magnetic permeability of feebly magnetic materials at such a low value of magnetic field strength.

Studies of the properties of feebly magnetic materials have been carried out, primarily with a view to the production of improved reference materials. These studies have shown [1]¹ that it is possible to produce reference materials which have a substantially constant relative magnetic permeability over the range from the earth's magnetic field to at least a magnetic field strength of 100 kA/m.

Since conventional metallic materials can also be used as reference materials their relative magnetic permeability can be determined using the reference method. It is important that the magnetic field strength used during the determination of the relative magnetic permeability is stated for all materials but in particular for conventional materials since the changes with applied magnetic field can be large. This behaviour also needs to be considered when using reference materials made from conventional materials to calibrate comparator methods. This is because these methods use magnetic fields that vary through the volume of the material being tested and this makes it difficult to know the relative magnetic permeability to use for the calibration.

Where the effect of a feebly magnetic material on the ambient earth's magnetic field is critical, the direct measurement of this effect using a sensitive magnetometer should be considered.

¹ Figures in square brackets refer to the bibliography.

MAGNETIC MATERIALS –

Part 15: Methods for the determination of the relative magnetic permeability of feebly magnetic materials

1 Scope

This part of IEC 60404 specifies a solenoid method, a magnetic moment method, a magnetic balance method and a permeability meter method for the determination of the relative magnetic permeability of feebly magnetic materials (including austenitic stainless steel). The magnetic balance and permeability meter methods are both comparison methods calibrated using reference materials to determine the value of the relative magnetic permeability of the test specimen. The relative magnetic permeability range for each of these methods is shown in Table 1. The methods given are for applied magnetic field strengths of between 5 kA/m and 100 kA/m.

Table 1 – Relative magnetic permeability ranges for the methods described

Measurement method	Relative magnetic permeability range
Solenoid	1,003 to 2
Magnetic moment	1,003 to 1,2
Magnetic balance	1,003 to 5
Permeability meter	1,003 to 2

NOTE 1 The relative magnetic permeability range given for the magnetic balance method covers the inserts provided with a typical instrument. These can only be assessed at values for which calibrated reference materials exist.

NOTE 2 For a relative magnetic permeability larger than 2, a reference material cannot be calibrated using this written standard. A note of this is given in the test report explaining that the values measured using the magnetic balance are for indication only.

The solenoid method is the reference method. The magnetic moment method described is used mainly for the measurement of the relative magnetic permeability of mass standards.

Two comparator methods used by industry are described. These can be calibrated using reference materials for which the relative magnetic permeability has been determined using the reference method. When suitable, the magnetic moment method can also be used. The dimensions of the reference material need to be given careful consideration when determining the uncertainty in the calibration value due to self-demagnetization effects. See Annex A for more information on correcting for self-demagnetization.

2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050 (all parts), *International Electrotechnical Vocabulary* (available at <http://www.electropedia.org/>)

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60050-221, IEC 60050-121 as well as the following apply.

3.1

self-demagnetization

generation of a magnetic field within a magnetized body that opposes the magnetization

3.2

demagnetize

to bring a magnetic material to a magnetically neutral state

3.3

feebly magnetic material

material that is essentially non-magnetic in character

4 Solenoid and magnetic moment method

4.1 General

The methods that are described in Clause 4 are reference methods for determining the relative magnetic permeability of test specimens of feebly magnetic materials with a length to diameter ratio of at least 10:1. When the relative magnetic permeability is less than 1,2, it is possible to use a moment detection coil and a test specimen with a length to diameter ratio of 1:1. Both methods use similar equipment and involve similar calculations to determine the relative magnetic permeability. The descriptions of both methods are therefore presented together here with significant differences explained in the text.

4.2 Principle

The relative magnetic permeability of a feebly magnetic test specimen is determined from the magnetic polarization J and the corresponding magnetic field strength H measured using the circuit shown in Figure 1 or Figure 5, using

$$\mu_r = 1 + \frac{J}{\mu_0 H} \quad (1)$$

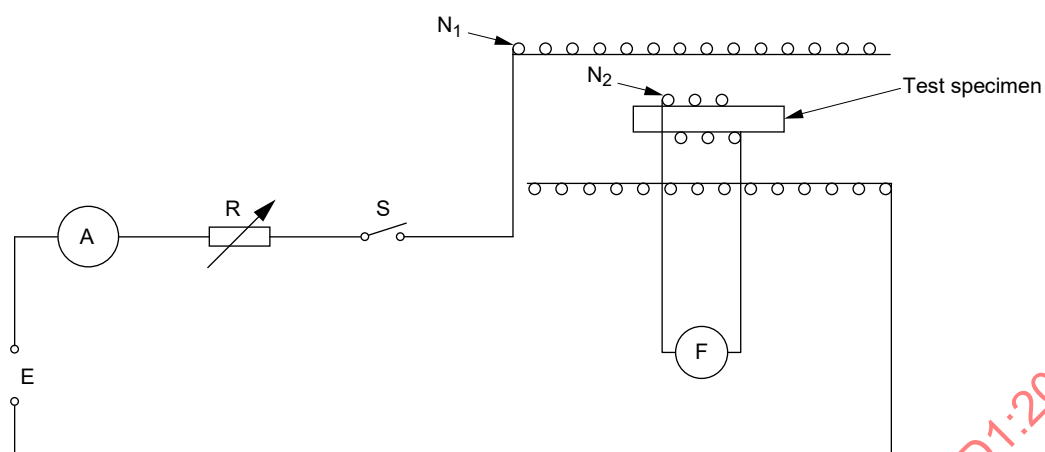
where

μ_r is the relative magnetic permeability of the test specimen (ratio);

μ_0 is the magnetic constant ($4\pi \times 10^{-7}$) (in H/m);

J is the magnetic polarization (in T);

H is the magnetic field strength (as calculated from the magnetizing current and the magnetic field strength to current ratio (known as the coil constant) for the solenoid) (in A/m).



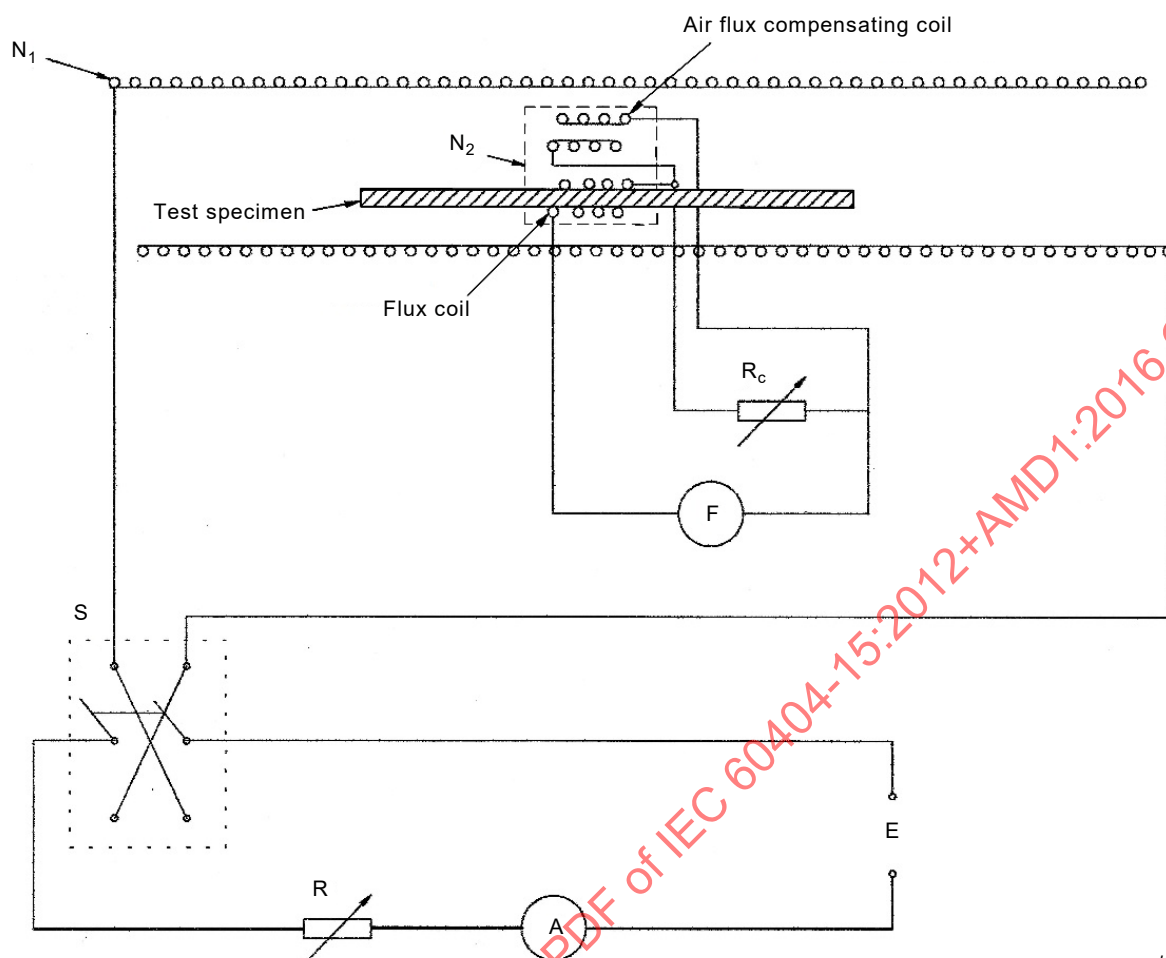
IEC 1691/12

Key

- A current measuring device or ammeter
- E d.c. supply
- F flux integrator
- N₁ solenoid
- N₂ search coil or magnetic moment detection coil
- R variable resistor (controlling magnetizing current)
- S switch

Figure 1 – Circuit diagram for the solenoid method with withdrawal of test specimen

NOTE In Figure 1, the search coil N₂ is replaced by a moment detection coil for the magnetic moment method.



IEC

Key

- A Current measuring device or ammeter
- E d.c. power supply
- F Flux integrator
- N_1 Solenoid
- N_2 Compensated search coil
- R Variable resistor (controlling magnetizing current)
- R_c Variable resistor (to adjust the output of the air flux compensating coil)
- S Switch for reversing the current in the solenoid

**Figure 5 – Circuit diagram for the solenoid method
with reversing of magnetizing current**

4.3 Apparatus

4.3.1 Solenoid. The solenoid shall have a length to diameter ratio of not less than 10:1 or, in the case of lower length, it shall contain coaxial supplementary coils at the ends or it shall consist of a split pair coil system (Garrett [2]). The last two coil systems shall yield at least the same degree of field homogeneity in the centre as is obtained with the long solenoid. The coils shall be wound on non-magnetic, non-conducting formers. The winding shall have a sufficient number of turns of wire to be capable of carrying a current that will produce a magnetic field strength of 100 kA/m. The magnetic field to current ratio of the solenoid (known as the coil constant) shall be determined with an uncertainty of $\pm 0,5 \%$ or better, either by an independent calibration or alternatively by measuring the magnetic field strength by means of

a calibrated Hall effect probe and by measuring the corresponding magnetizing current (using the method described in 4.3.5).

NOTE 1 More than one solenoid (or split pair coil system) may be required to cover the complete range of magnetic field strength.

NOTE 2 The optimal diameter of the solenoid depends upon the diameter of test specimens to be measured and the sensitivity of the measurement. For measurements on bars up to 30 mm in diameter having a relative magnetic permeability of 1,005, the internal diameter of the solenoid would be approximately 80 mm to accommodate the requisite search coil.

4.3.2 Search coil for the solenoid method with withdrawal of test specimen. For the solenoid method with withdrawal of test specimen, the search coil shall be wound on a non-magnetic, non-conducting former. Typically, for test specimens up to 30 mm in diameter, the internal diameter of the aperture in the search coil is 32 mm to allow test specimens to be freely inserted and withdrawn. The length of the winding shall be 40 mm; end cheeks of between 75 mm and 80 mm diameter shall be fitted to the former. The winding can be, for example, 10 000 turns of 0,2 mm diameter insulated wire with interleaving as necessary.

NOTE The winding ~~may~~ can be tapped at intervals to facilitate the adjustment of the sensitivity of the measuring system when determining the relative magnetic permeability of test specimens in the higher part of the permeability range.

4.3.7 Search coil for the solenoid method with reversing of magnetizing current. For the solenoid method with reversing of magnetizing current, the flux coil and the air flux compensating coil shall each be wound on a non-magnetic non-conducting former. The cross section area of the flux coil shall be no more than ten times that of the test specimen and there must be a sufficient number of turns for adequate resolution (typically >1 000 turns). The flux coil should be no longer than 20 % of the test specimen length.

The flux coil and the air flux compensating coil are connected in series opposition to form a compensated search coil. The length and effective area-turns of the flux coil and the air flux compensating coil shall be nearly equal, with the area-turns of the air flux compensating coil slightly larger than those of the flux coil so the compensating signal can be attenuated with a variable resistor (R_c in Figure 5) to match the signal from the empty flux coil.

The air flux compensating coil shall be located a sufficient distance from the flux coil such that there is no significant coupling to the magnetic flux of the test specimen. Coupling will change the effectiveness of the compensation when a sample is present, and can cause significant measurement error.

The signal from the air flux compensating coil shall be adjusted to exactly cancel the signal from the empty flux coil. With no sample present, apply the highest magnetizing current to be used in the test, reset the flux integrator, reverse the magnetizing current, and adjust the variable resistor R_c to obtain the minimum output from the compensated coil set N_2 . Repeat as necessary until the output is as low as can be adjusted.

4.3.3 Moment detection coil. For much shorter solid right cylinders with a length to diameter ratio of 1:1, a moment detection coil with a homogeneous sensitivity over the volume of the test specimen shall be used for measuring the magnetic dipole moment of the cylinder (see Figure 2). The magnetic polarization is calculated from

$$J = \frac{j}{V} \quad (2)$$

where

J is the magnetic polarization (in T);

j is the magnetic dipole moment (in Wbm);

V is the volume of the test specimen (in m³).

The moment detection coil can be a solenoid with additional homogenizing windings close to the ends of the coil.

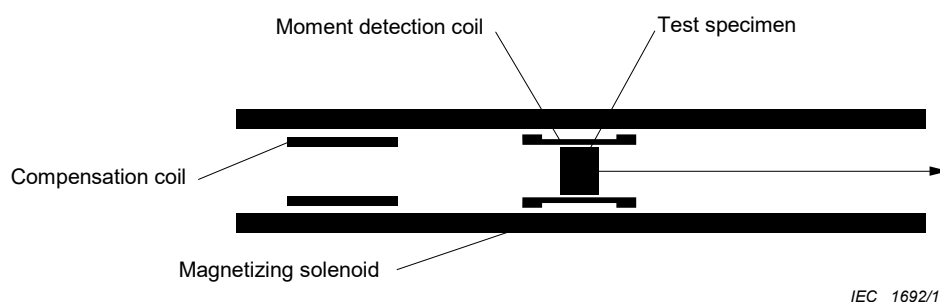


Figure 2 – Coil system for the determination of the magnetic dipole moment

The measurement of the magnetic moment of short cylinders with a length to diameter ratio of 1:1 shall be restricted to materials having a relative permeability smaller than $\mu_r = 1,2$. If this condition is not met, the magnetic field strength inside the test specimen and the polarization become inhomogeneous and this will produce significant errors in the measured relative magnetic permeability.

In the region $\mu_r = 1,003$ to 1,2, a linear correction for the effect of the self-demagnetizing field is appropriate. See Annex A for more information.

NOTE Typically, weight pieces of the classes E₁, E₂ and E₃ according to OIML R111-1 (2004) [3] fall into this range.

For this correction, equation (A.2) of Annex A is to be used together with the value of the magnetometric self-demagnetization factor N_m as obtained from reference [6].

For example, for a cylindrical sample with a 1:1 aspect ratio, values of the relative correction to the applied magnetic field for different relative magnetic permeabilities due to self-demagnetization are given in Table 2.

Table 2 – Cylindrical sample with a 1:1 aspect ratio

μ_r	N_m	$\Delta H/H$
1,000 1	0,311 6	0,003 %
1,007	0,311 4	0,22 %
1,2	0,309 3	6,2 %

$\Delta H/H$ is the relative correction of the magnetic field strength and N_m is the magnetometric self-demagnetization factor.

This is discussed in more detail in Annex A.

4.3.4 Flux integrator. The flux integrator shall be an electronic charge integrator or similar device, calibrated with an uncertainty of $\pm 0,5$ % or better.

4.3.5 Current measuring device. The current measuring device shall consist of a calibrated resistor connected in series with the magnetizing circuit and a calibrated digital voltmeter.

The magnetizing current shall be determined from the measurement of the voltage developed across the resistor. The combined uncertainties of the resistor and voltmeter shall be such that the magnetizing current can be determined with an uncertainty of $\pm 0,2$ % or better. Alternatively, an ammeter calibrated with an equivalent uncertainty can be used.

4.3.6 Micrometer. The micrometer for measuring the transverse dimensions of the test specimen for the solenoid method shall be calibrated. For the magnetic moment method, the volume is required and appropriate dimensional measurements shall be made.

4.4 Test specimen for the solenoid method

The test specimen shall consist of a round or rectangular bar, or a number of strips or wires having a total cross-sectional area of at least 100 mm². The maximum cross-sectional area shall be determined by the diameter of the central aperture of the search coil. Allowance shall be made for the easy insertion and withdrawal of the test specimen without disturbing the position of the search coil.

To avoid significant errors introduced by self-demagnetization, the length to equivalent diameter ratio of the test specimen shall be not less than 10:1. When corrections for self-demagnetization are required see Annex A.

For example, values are given in Table 3 for a rod of circular cross section with an aspect ratio of 10:1, a diameter of 30 mm and a search coil with an effective average diameter of 52,2 mm. The relative corrections to the applied magnetic field strength and the magnetic polarization for different relative magnetic permeabilities due to self-demagnetization are shown.

Table 3 – Circular cross section rod with an aspect ratio of 10:1

μ_r	N_f	$\Delta H/H$	$\Delta J/J$
1,000 1	0,004 927	0,000 %	1,49 %
1,007	0,004 931	0,003 %	1,49 %
1,2	0,005 054	0,101 %	1,53 %
2	0,005 541	0,554 %	1,68 %

$\Delta H/H$ is the relative correction of the magnetic field strength, N_f is the fluxmetric self-demagnetization factor and $\Delta J/J$ is the relative correction of the magnetic polarization.

This is discussed in more detail in Annex A.

4.5 Procedure

4.5.1 Cross-sectional area of test specimen. The cross-sectional area of the test specimen shall be established from a number of measurements of each dimension. For a test specimen for the solenoid method, the diameter or transverse dimensions shall be measured by means of a calibrated micrometer (see 4.3.6) at approximately 10 mm intervals along the central 40 mm of length. The mean cross-sectional area, expressed in square metres, shall be calculated from the mean dimensions, with an uncertainty of $\pm 0,5\%$. The difference between the greatest and least cross-sectional areas shall not exceed $\pm 0,5\%$ of the mean area.

For a test specimen for the magnetic moment method, the determination of the volume is required and sufficient dimensional measurements shall be made so that this can be determined with an uncertainty of $\pm 0,71\%$ (this is the square root of the sum of the squares of $0,5\%$ for the cross section and $0,5\%$ for the length).

4.5.2 Calibration of flux integrator. The calibration of the flux integrator shall be established with an uncertainty of $\pm 0,5\%$ or better. In order to do this, the secondary winding of a calibrated mutual inductor is connected in series with the search coil and flux integrator and the current flowing in the primary winding of the mutual inductor is changed to give the change in magnetic flux required. From the integrator reading, equation (3) is used to determine the calibration constant of the integrator.

$$k\Phi_{IR} = M\Delta I \quad (3)$$

where

k is the calibration constant of the flux integrator;

Φ_{IR} is the flux integrator reading (in Wb);

M is the mutual inductance for the calibration (in H);

ΔI is the change in primary current in the mutual inductor (in A).

NOTE It is important that the total winding resistance at the input of the integrator is the same for calibration and measurements on the test specimen. To avoid the possibility of coupling of the search coil or moment coil to the mutual inductor, a non-inductive resistance equivalent to the secondary of the mutual inductor can be placed in series with the search coil or the moment coil.

4.5.3 Demagnetization of test specimen. The test specimen shall be demagnetized immediately prior to the measurement from a magnetic field strength of not less than 20 kA/m by the slow reversal of a gradually reducing direct current or a gradually reducing alternating current (for the frequency, see next paragraph), provided the magnetic field produced by the latter can completely penetrate the test specimen. Test specimens which have been subjected to a higher magnetic field strength shall be demagnetized from a suitably high magnetic field before measurement. The effectiveness of the demagnetization shall be checked by inserting the test specimen into the search coil or moment detection coil and, with no current flowing, withdrawing the test specimen and observing the reading on the flux integrator. There shall be either a zero reading or an insignificantly small reading on the flux integrator.

In order that the magnetic field may completely penetrate the test specimen, the frequency of reversal shall not exceed 0,5 Hz for a cross-section of 10 mm $\times$ 10 mm and 0,1 Hz for a cross-section of 20 mm $\times$ 20 mm. Some materials may also display magnetic viscosity effects so that even slower reversals are required to ensure complete demagnetization. In cases of doubt, the effect of slower and more rapid reversals shall be compared.

The magnetizing current to produce the required magnetic field strength shall be calculated from the magnetic field strength to current ratio previously determined for the solenoid (see 4.3.1).

At low values of magnetic field strength, the earth's magnetic field may be significant. It is recommended that the axis of the solenoid is aligned in a horizontal plane in a direction normal to the horizontal component of the earth's magnetic field.

~~The magnetic polarization shall be measured by inserting the demagnetized test specimen into the search coil or moment detection coil, adjust the magnetizing current to the required value taking care not to overshoot, zero the flux integrator, withdraw the test specimen and record the integrator reading. Care shall be taken to withdraw the test specimen from the search coil or moment detection coil to a position where it no longer has an influence on the search coil or moment detection coil, as indicated by the integrator reading.~~

~~For the solenoid method, the complete measurement procedure shall be repeated with the other end of the test specimen inserted into the search coil. Either the two integrator readings shall be averaged or used separately, depending on the customer's requirement.~~

~~The procedure is repeated as necessary to determine the given measurement repeatability.~~

~~NOTE—Small fluctuations of the magnetizing current or of the ambient magnetic field can induce large instabilities in the measured flux. To avoid this, a compensation coil can be used.~~

~~The weight of the specimen can change the direction of the search coil axis used in the solenoid method by a small amount during the withdrawal of the specimen, which leads to an additional induced voltage in the search coil. Therefore the search coil should be fixed very rigidly or mechanically decoupled from the movement of the specimen.~~

~~Electrostatic charging of the search coil or moment coil during the withdrawal of the specimen can disturb the flux measurements and should be prevented. A copper shielding might be effective to avoid signal contributions from electrostatic charges.~~

4.5.4 Measurement of magnetic polarization with withdrawal of the test specimen. The magnetic polarization shall be measured by inserting the demagnetized test specimen into the search coil or moment detection coil, adjust the magnetizing current to the required value taking care not to overshoot, zero the flux integrator, withdraw the test specimen and record the integrator reading. Care shall be taken to withdraw the test specimen from the search coil or moment detection coil to a position where it no longer has an influence on the search coil or moment detection coil, as indicated by the integrator reading.

The weight of the specimen can change the direction of the search coil axis used in the solenoid method by a small amount during the withdrawal of the specimen, which leads to an additional induced voltage in the search coil. Therefore the search coil should be fixed very rigidly or mechanically decoupled from the movement of the specimen.

Electrostatic charging of the search coil or moment coil during the withdrawal of the specimen can disturb the flux measurements and should be prevented. A copper shielding might be effective to avoid signal contributions from electrostatic charges.

Small fluctuations of the magnetizing current or of the ambient magnetic field can induce large instabilities in the measured flux. To avoid this, a compensation coil can be used.

4.5.5 Measurement of magnetic polarization with reversing of magnetizing current. The magnetic polarization shall be measured by inserting the demagnetized test specimen into the center of the compensated search coil, adjust the magnetizing current to the required positive value taking care not to overshoot, zero the flux integrator, reverse the magnetizing current to the same amplitude as the positive value taking care not to overshoot, and record the integrator reading. The reading represents two times the magnetic polarization due to the current reversal.

NOTE The use of an air flux compensating coil and compensating resistor allows the air flux enclosed by the flux coil to be cancelled out so that magnetic polarization can be measured directly (see 4.3.7).

4.5.6 Averaging over the two sample directions. For the solenoid method, the complete measurement procedure shall be performed two times, once with one end of the test specimen inserted into the search coil and again with the other end inserted into the search coil. Either the two integrator readings shall be averaged or used separately, depending on the customer's requirement.

4.5.7 Repeatability. The procedure is repeated as necessary to determine the measurement repeatability.

4.6 Calculation

For the solenoid method with withdrawal of test specimen, the magnetic polarization shall be calculated using Equation (4):

$$J = \frac{\Phi_{IR}}{NA_s} \quad (4)$$

For the solenoid method with reversing of magnetizing current, the magnetic polarization shall be calculated using Equation (7):

$$J = \frac{\Phi_{IR}}{2NA_s} \quad (7)$$

where

J is the magnetic polarization (in T);

Φ_{IR} is the flux integrator reading corrected in accordance with the integrator calibration (in Wb);

A_s is the cross sectional area of the test specimen (in m²);

N is the number of turns of the search coil.

For the magnetic moment method, the magnetic dipole moment shall be calculated using equation (5):

$$j = \Phi_{IR} \cdot \left(\frac{H}{I} \right)^{-1} \quad (5)$$

where

j is the magnetic dipole moment (in Wbm);

Φ_{IR} is the flux integrator reading corrected in accordance with the integrator calibration (in Wb);

H/I is the coil constant (magnetic field strength to current ratio) of the moment coil system (in (A/m)/A).

The magnetic polarization, J , shall then be calculated using equation (2).

If necessary, see Annex A for the calculation of corrections for self-demagnetization. In that case, the relative magnetic permeability of the test specimen shall be calculated from the following equation:

$$\mu_r = 1 + \frac{J}{\mu_0 H} \quad (6)$$

where

μ_r is the relative magnetic permeability of the test specimen (ratio);

μ_0 is the magnetic constant ($4\pi \times 10^{-7}$) (in H/m);

J is the magnetic polarization (in T);

H is the magnetic field strength (in A/m) (as calculated from the magnetizing current and the coil constant of the solenoid).

4.7 Uncertainty

The estimation of the uncertainties in the measurements associated with the solenoid and magnetic moment methods shall be divided into three elements: the uncertainty in the measurement of the magnetic polarization (J), the uncertainty in the measurement of the magnetic field strength (H) and, from these, the determination of the uncertainty of the relative magnetic permeability minus 1 ($\mu_r - 1$). From this, the absolute uncertainty in the relative magnetic permeability (μ_r) shall be determined. If corrections have been applied for demagnetisation, a contribution for this shall be included in the uncertainty budget.

The individual contributions to these uncertainties shall be determined and then combined in accordance with the guidelines set out in the ISO/IEC Guide to the expression of uncertainty in measurement (ISO/IEC GUIDE 98-3: 2008).

5 Magnetic balance method

5.1 Principle

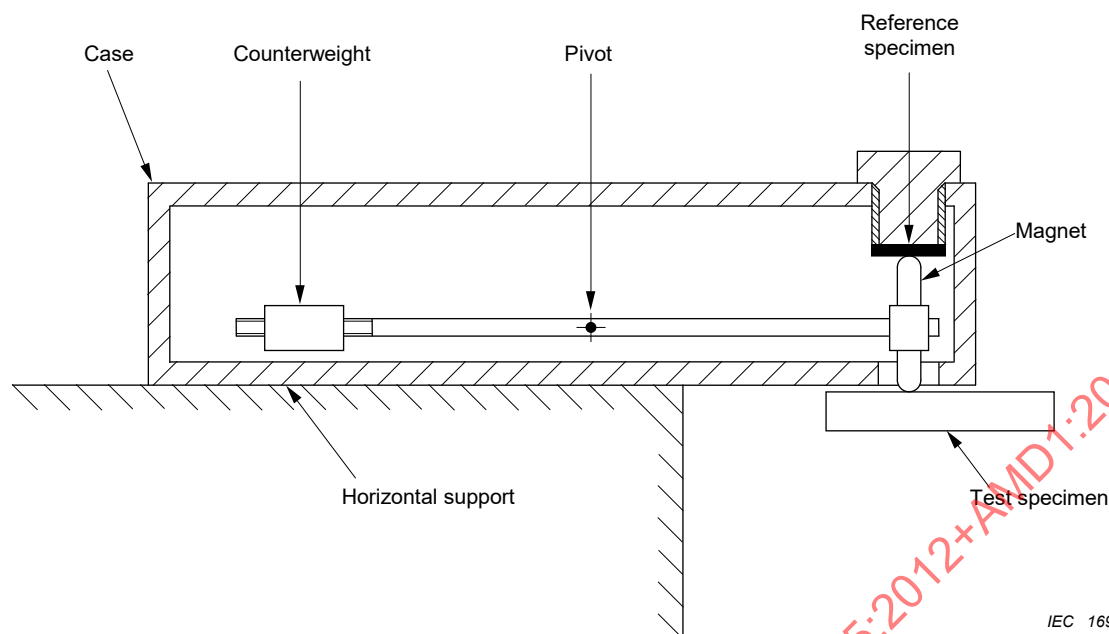
This is a comparator method that provides industry with a convenient way of determining the relative magnetic permeability of a material that is “less than” or “greater than” that of disc inserts.

The magnetic balance is designed for the determination of the relative magnetic permeability of small test specimens and components, which are unsuitable for measurement by the reference method. In addition, it is useful for in situ and on site measurements on materials and complete assemblies.

The relative magnetic permeability is determined by comparing the attraction of a magnet to a series of disc inserts and the specimen under test using commercially available instruments such as that shown in Figure 3. See 5.2 for information about disc inserts and materials.

The magnet is either attracted to a disc insert screwed into the top of the instrument above the magnet, or to the test specimen placed beneath the magnet, depending on which material has the higher effective relative magnetic permeability. Some types of insert have a ferromagnetic grub screw fitted in the cap. This screw is adjusted by the manufacturer to produce specific values of effective relative magnetic permeability at the point where the magnet contacts a metal disc of very low magnetic permeability.

NOTE 1 For the limitations regarding the dependence of relative magnetic permeability with magnetic field strength, see the Introduction to this standard.



IEC 1693/12

Figure 3 – Magnetic balance: side view

NOTE 2 Other forms of this instrument exist. One such instrument has a phosphor bronze hair spring attached to the central pivot and to an index-type knob having a scale with arbitrary divisions. In this case, the force required to detach the magnet from a reference material, as indicated by the scale reading, is compared with that for the specimen under test. Another type of instrument employs a strain gauge to measure this force. The remainder of this section considers the use of disc inserts only. For other types of instruments, these disc inserts can be replaced by calibrated reference materials.

5.2 Disc inserts and reference materials

5.2.1 A series of disc inserts (supplied with the balance) covering the range of relative magnetic permeability from 1,005 to 5 can be used (see 5.1).

The relative magnetic permeability of the disc inserts is assessed by using a number of calibrated reference materials. Disc inserts that have a nominal relative magnetic permeability larger than 2 cannot be assessed.

For a relative magnetic permeability larger than 2, a reference material cannot be calibrated using this standard. A note of this should be given in the test report explaining that the values measured using the magnetic balance are for indication only.

Reference materials in the form of a rod made up of a number of short cylinders of similar materials should be calibrated by the solenoid method or magnetic moment method. Individual cylinders should then be used to check the approximate relative magnetic permeability of the disc insert.

NOTE The reference materials or disc inserts may be sent to national measurement laboratories that offer this calibration capability.

5.3 Test specimen

The dimensions of the test specimen shall be either:

- a) 25 mm × 25 mm (or 25 mm diameter) and 25 mm thick; or
- b) less than this subject to agreement between the respective parties.

One face shall be finished smooth, flat and clean from machine tool contamination. Since the relative magnetic permeability of most materials and alloys is sensitive to heat treatment and

mechanical working, material immediately adjacent to cut edges shall not be used. Care shall be taken to avoid the effects of heating and work hardening during machining.

Where necessary, finishing shall be carried out by light grinding with sufficient coolant.

NOTE For test specimens of dimensions less than 25 mm, an error in the measured permeability value could be introduced [4]. The magnitude of this error will be dependent upon the dimensions and permeability of the material. The best results are achieved when the test and reference materials are of similar dimensions.

5.4 Procedure

5.4.1 The test specimen and the reference material shall be demagnetized in accordance with 4.5.3.

Where the size or location of the test specimen does not allow demagnetization to be carried out, this shall be stated on the test report.

5.4.2 The magnetic balance shall be placed on a horizontal surface with the disc insert of highest value of relative magnetic permeability in place. The test specimen shall be offered up to the underside of the magnet. If the magnet is attracted to the test specimen then the relative magnetic permeability of the material is greater than can be determined by the instrument. If the magnet is attracted to the disc insert then sequentially replace the disc insert with those of progressively lower relative magnetic permeability until the magnet is attracted to the test specimen.

The procedure shall be repeated several times over the surface of the test specimen to check the consistency and uniformity of the value. Measurements shall not be taken close to edges or in small re-entrant areas.

5.5 Evaluation of the relative magnetic permeability

The relative magnetic permeability of the test specimen shall be taken as being in the range between the last two disc inserts, that is between the one in place when the magnet is attracted to the test specimen and the one of lowest permeability to which the magnet is attracted.

NOTE The disc inserts can be compared to reference materials calibrated at national measurement institutes that offer this capability.

5.6 Uncertainty

The uncertainty in the calibration of the disc inserts or reference materials used shall be stated (see 4.7 for the uncertainty of the solenoid method).

NOTE Due to the fact that the instrument can only determine the range in which the relative magnetic permeability lies, it is not possible to assign an uncertainty value to the measurement.

6 Permeability meter method

6.1 Principle

This is a comparator method that provides industry with a convenient method of determining the relative magnetic permeability of a material.

The permeability meter method, schematically shown in Figure 4, is suitable for determining the relative permeability of feebly magnetic materials between $\mu_r = 1,0$ and $2,0$.

The change in magnetic flux density produced in the air at one pole of a permanent magnet is measured, using commercially available permeability meters, when a low magnetic permeability test specimen is placed in contact with that pole. The changes in magnetic flux

density are small and are measured with a fluxgate magnetometer(s) in a gradiometer arrangement built into a probe which also houses the permanent magnet, see Figure 4.

When the instrument is calibrated against standards with known permeability values as determined by the manufacturer of the instrument against their calibrated standards or national standards, the measured values of the relative permeability can be made traceable to national standards. These standards can also be sent to national measurement laboratories for calibration.

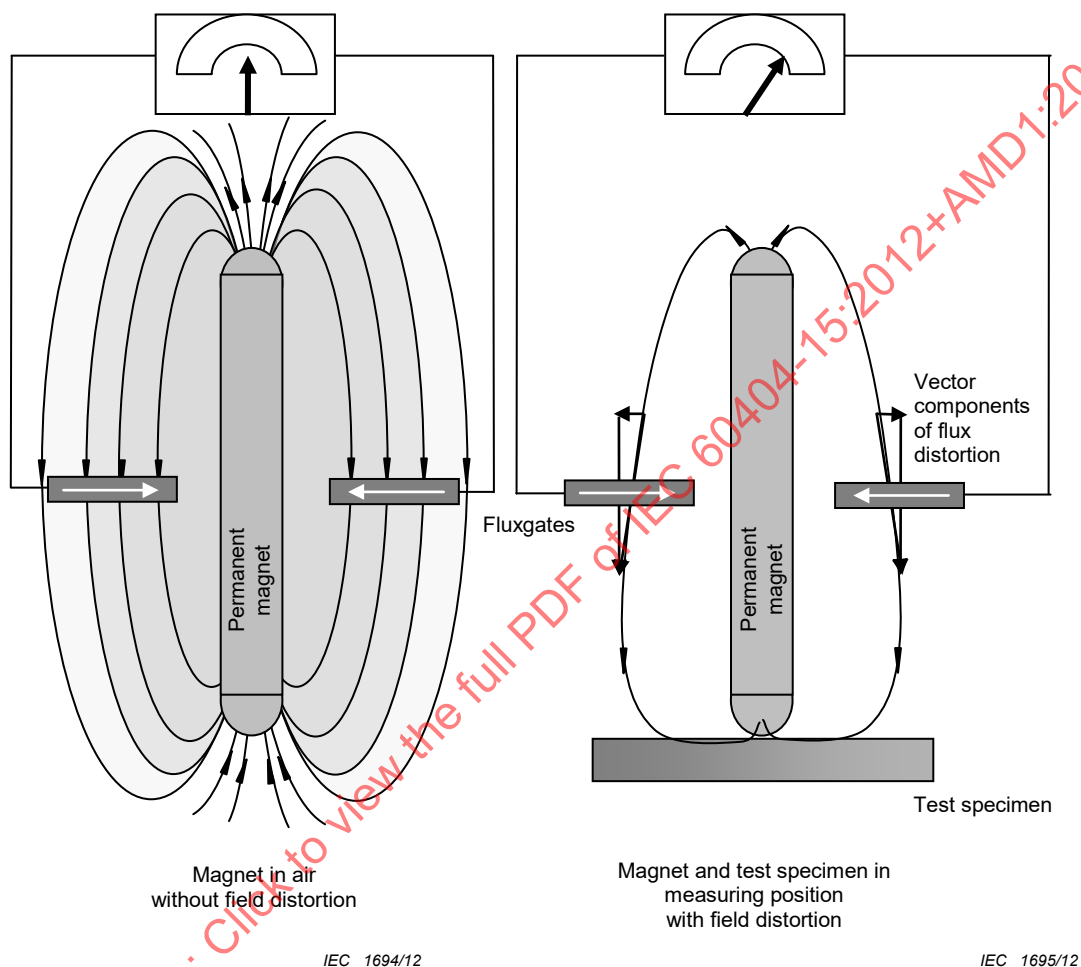


Figure 4 – Schematic of the permeability meter arrangement and magnetic field distribution without and with test specimen

6.2 Reference specimens and materials

The instrument shall be calibrated at a minimum of one point on each range to be used using the appropriate number of reference materials. The reference materials shall be calibrated using the solenoid method or the magnetic moment method (see Clause 4). Size and shape of the reference sample are critical and, for absolute measurements, they shall be in accordance with the specifications of the instrument manufacturer.

NOTE Reference samples are available from the instrument manufacturers and some calibration laboratories and national measurement laboratories. They may be submitted for calibration to those standard laboratories that offer the capability for this kind of calibration.

6.3 Test specimen

The test specimen shall be in accordance with 5.3.

6.4 Procedure

The test specimen and the reference specimen shall be demagnetized in accordance with 4.5.3.

Where the size or location of the test specimen does not allow demagnetization to be carried out, this shall be stated on the test report.

The probe shall be mounted such that it will not be moved during the measurement since small changes in the ambient magnetic field strength affect the zero setting of the instrument. Without the test specimen in place, the instrument shall be zeroed in accordance with the manufacturer's instructions. The test specimen shall be brought into contact with the magnet pole tip in the probe and the range of the permeability meter shall be adjusted to give a reading on the scale and, where possible, the range shall be selected which gives the largest deflection for good resolution. The test specimen shall be removed, checked and if necessary the zero of the instrument adjusted. The measurement of the test specimen shall be repeated at several places on flat areas and record the results. The instrument shall then be calibrated on the range used with a suitable reference specimen, see 6.2. The indicated permeability values for the test specimen shall then be adjusted accordingly.

6.5 Uncertainty

The estimation of the uncertainty in the measurement of the relative magnetic permeability by the permeability meter method shall be divided into two elements: the uncertainty in the value of the reference material and the resolution and repeatability of the permeability meter.

NOTE An additional uncertainty may be incurred if the test and reference specimens are not of similar dimensions.

The individual contributions to these uncertainties shall then be identified and then combined in accordance with the guidelines set out in the ISO/IEC Guide to the expression of uncertainty in measurement (ISO/IEC GUIDE 98-3: 2008).

7 Test report

The test report shall include the following:

- a statement that the measurement procedure was conducted in accordance with this standard;
- the method used;
- a note on whether demagnetization has been performed;
- the number and size of the specimens tested;
- the value of the relative magnetic permeability;
- for the solenoid method, the value of applied magnetic field strength;
- the temperature during the measurement;
- a statement on the uncertainty of the determined value of relative magnetic permeability.

Annex A (informative)

Correction for self-demagnetization

A.1 General

For both the solenoid and magnetic moment methods, corrections will be needed for self-demagnetization.

In 4.3.3, example figures were given for the relative corrections for the magnetic moment method.

In 4.4, example figures were given for the relative corrections for the solenoid method.

The calculations to determine these figures are given in this annex.

A.2 Solenoid method

When the ratio of the length to equivalent diameter of the test specimen is less than 10:1, a correction for self-demagnetization may be necessary.

A correction, ΔJ (in T), to the measured polarization is determined from equation (A.1):

$$\Delta J = \frac{A_W}{A_S} N_f J \quad (\text{A.1})$$

where

- N_f is the fluxmetric/ballistic demagnetization factor [5,6];
- A_W is the effective cross sectional area of the search coil (in m²);
- A_S is the cross sectional area of the test specimen (in m²);
- J is the measured polarization (in T).

A correction, ΔH (in A/m), to the applied magnetic field strength is determined using equation (A.2):

$$\Delta H = -\frac{N_f J}{\mu_0} \quad (\text{A.2})$$

where

- μ_0 is the magnetic constant ($4\pi \times 10^{-7}$) (in H/m).

The corrected magnetic polarization J and the applied magnetic field strength H are used in equation (6) to determine the relative magnetic permeability.

When a correction for self-demagnetization is made, an uncertainty contribution needs to be included and this shall be determined for each measurement.

Equation (A.1) only applies when the return flux through the search coil is homogeneous. This should be appropriate for test specimens that meet the conditions given in 4.4 and for solenoids having a small distance between sample and winding (see 4.3.2). However, for shorter samples or for coils with a larger gap between sample and winding, the inhomogeneous profile of the self-demagnetizing field should be taken into account. Such a correction can be carried out by numerical calculation of the self-demagnetizing field.

A.3 Magnetic moment method

A correction, ΔH (in A/m), to the applied magnetic field strength is determined using equation (A.3):

$$\Delta H = -\frac{N_m J}{\mu_0} \quad (\text{A.3})$$

where

N_m is the magnetometric demagnetization factor [6].

The corrected magnetic polarization J and applied magnetic field strength H are used in equation (6) to determine the relative magnetic permeability.

When a correction for self-demagnetization is made an uncertainty contribution needs to be included and this shall be determined for each measurement.

NOTE For relative magnetic permeabilities above 1,2, the magnetic field inside the test specimen and the polarization of the test specimen become inhomogeneous resulting in significant errors.

Bibliography

- [1] HALL, M.J., DRAKE, A.E., HARMON S.A.C. and AGER, C.I., Low permeability reference standards with improved high magnetic field strength performance. IEE Proceedings – Scientific Measurement Technology, 1988, 145(4), 181-183
- [2] GARRETT, M.W.: Axially symmetric system for generating and measuring magnetic field. Part 1. J.Appl.Phys. 22(1951), 1091-1107
- [3] OIML R111-1 (2004): weight of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3
- [4] HALL, M.J., DRAKE, A.E., HENDERSON, L.C.A., Guidance notes for use with NPL low permeability reference standards, NPL Report CEM 12, March 1999
- [5] JOSEPH, R.I., Ballistic demagnetizing factor in uniformly magnetized cylinders. J App Phys, 1966, Vol. 37 No. 13, pp 4639-4643
- [6] CHEN, D.-X., BRUG, J.A., GOLDFARB, R.B., "Demagnetizing Factors for Cylinders", IEEE Trans. Mag. 27 (1991) pp 3601-3619
- [7] EN 12163, *Copper and copper alloys – Rod for general purposes*
- [8] EN 10088-1, *Stainless steels – Part 1: List of stainless steels*

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	25
INTRODUCTION	27
1 Domaine d'application	28
2 Références normatives	29
3 Termes et définitions	29
4 Méthode utilisant un solénoïde et méthode utilisant le moment magnétique	29
4.1 Généralités	29
4.2 Principe	29
4.3 Appareillage	31
4.4 Éprouvette pour la méthode utilisant un solénoïde	34
4.5 Procédure	35
4.6 Calcul	37
4.7 Incertitudes	38
5 Méthode de la balance magnétique	38
5.1 Principe	38
5.2 Disques et matériaux de référence	39
5.3 Éprouvette	40
5.4 Procédure	40
5.5 Évaluation de la perméabilité magnétique relative	40
5.6 Incertitudes	40
6 Méthode de l'appareil de mesure de la perméabilité	41
6.1 Principe	41
6.2 Éprouvettes et matériaux de référence	42
6.3 Éprouvette	42
6.4 Procédure	42
6.5 Incertitudes	43
7 Rapport d'essai	43
Annexe A (informative) Correction pour l'autodésaimantation	44
Bibliographie	46
Figure 1 – Schéma de circuit de la méthode utilisant un solénoïde avec retrait de l'éprouvette	30
Figure 2 – Système de bobines pour la détermination du moment du dipôle magnétique	33
Figure 3 – Balance magnétique vue de côté	39
Figure 4 – Schéma de la disposition de l'appareil de mesure de la perméabilité et de la distribution du champ magnétique avec et sans éprouvette	42
Figure 5 – Schéma de circuit de la méthode utilisant un solénoïde avec inversion du courant d'aimantation	31
Tableau 1 – Gammas de perméabilité magnétique relative pour les méthodes décrites	28
Tableau 2 – Échantillon cylindrique de rapport 1:1	33
Tableau 3 – Tige de section circulaire de rapport 10:1	34

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

Partie 15: Méthodes de détermination de la perméabilité magnétique relative des matériaux faiblement magnétiques

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

DÉGAGEMENT DE RESPONSABILITÉ

Cette version consolidée n'est pas une Norme IEC officielle, elle a été préparée par commodité pour l'utilisateur. Seules les versions courantes de cette norme et de son(ses) amendement(s) doivent être considérées comme les documents officiels.

Cette version consolidée de l'IEC 60404-15 porte le numéro d'édition 1.1. Elle comprend la première édition (2012-09) [documents 68/442/FDIS et 68/443/RVD] et son amendement 1 (2016-12) [documents 68/531/CDV et 68/544/RVC]. Le contenu technique est identique à celui de l'édition de base et à son amendement.

Dans cette version Redline, une ligne verticale dans la marge indique où le contenu technique est modifié par l'amendement 1. Les ajouts sont en vert, les suppressions sont en rouge, barrées. Une version Finale avec toutes les modifications acceptées est disponible dans cette publication.

La Norme internationale IEC 60404-15 a été établie par le comité d'études 68 de l'IEC: Matériaux magnétiques tels qu'alliages et aciers.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60404, présentée sous le titre général *Matériaux magnétiques*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de la publication de base et de son amendement ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IMPORTANT – Le logo "*colour inside*" qui se trouve sur la page de couverture de cette publication indique qu'elle contient des couleurs qui sont considérées comme utiles à une bonne compréhension de son contenu. Les utilisateurs devraient, par conséquent, imprimer cette publication en utilisant une imprimante couleur.

INTRODUCTION

Il est souvent nécessaire de déterminer la perméabilité magnétique relative des matériaux faiblement magnétiques pour évaluer leur effet sur le champ magnétique ambiant. Les matériaux faiblement magnétiques typiques sont les aciers inoxydables austénitiques et le laiton "non magnétique".

La perméabilité magnétique relative de certains de ces matériaux peut varier de manière significative avec l'intensité du champ magnétique appliqué. Dans la majorité des cas, ces matériaux sont utilisés dans des applications relatives au champ magnétique terrestre ambiant. En Europe, ce champ est compris entre 35 A/m et 40 A/m, en Extrême-Orient, il est compris entre 25 A/m et 35 A/m et en Amérique du Nord, entre 25 A/m et 35 A/m. Toutefois, à l'heure actuelle, aucune méthode de mesure ne permet de déterminer la perméabilité magnétique relative des matériaux faiblement magnétiques à une valeur si faible de l'intensité du champ magnétique.

Les propriétés des matériaux faiblement magnétiques ont été étudiées, principalement pour produire des matériaux de référence améliorés. Ces études ont montré [1]¹ qu'il est possible de produire des matériaux de référence qui présentent une perméabilité magnétique relative très constante sur la gamme allant du champ magnétique terrestre à une intensité de champ magnétique supérieure ou égale à 100 kA/m.

Puisque des matériaux métalliques traditionnels peuvent également être utilisés comme des matériaux de référence, leur perméabilité magnétique relative peut être déterminée en utilisant la méthode de référence. Il est important que l'intensité du champ magnétique utilisée pour déterminer la perméabilité magnétique relative soit établie pour tous les matériaux, mais en particulier pour les matériaux traditionnels puisque les variations avec le champ magnétique appliqué peuvent être importantes. Ce comportement nécessite également d'être considéré si les matériaux de référence utilisés sont faits à partir de matériaux traditionnels pour étalonner les méthodes de comparaison. Cela est dû au fait que ces méthodes utilisent des champs magnétiques qui varient dans le volume du matériau soumis à l'essai et il est difficile de déterminer la perméabilité magnétique relative à utiliser pour l'étalonnage.

Lorsque l'effet d'un matériau faiblement magnétique sur le champ magnétique terrestre ambiant est critique, il convient de considérer la mesure directe de cet effet en utilisant un magnétomètre sensible.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie.

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

Partie 15: Méthodes de détermination de la perméabilité magnétique relative des matériaux faiblement magnétiques

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60404 spécifie une méthode utilisant un solénoïde, une méthode utilisant le moment magnétique, une méthode utilisant une balance magnétique et une méthode utilisant un appareil de mesure de la perméabilité pour déterminer la perméabilité magnétique relative des matériaux faiblement magnétiques (y compris l'acier inoxydable austénitique). La méthode utilisant une balance magnétique et la méthode utilisant un appareil de mesure de la perméabilité sont toutes les deux des méthodes de comparaison étalonnées utilisant des matériaux de référence en vue de déterminer la valeur de la perméabilité magnétique relative de l'éprouvette. La gamme de perméabilité magnétique relative pour chacune de ces méthodes est présentée dans le Tableau 1. Les méthodes données portent sur des intensités de champ magnétique appliquées comprises entre 5 kA/m et 100 kA/m.

Tableau 1 – Gammes de perméabilité magnétique relative pour les méthodes décrites

Méthode de mesure	Gamme de perméabilité magnétique relative
Solénoïde	1,003 à 2
Moment magnétique	1,003 à 1,2
Balance magnétique	1,003 à 5
Appareil de mesure de la perméabilité	1,003 à 2

NOTE 1 La gamme de perméabilité magnétique relative donnée pour la méthode utilisant une balance magnétique couvre les disques fournis avec un instrument typique. Ces disques peuvent seulement être évalués à des valeurs pour lesquelles des matériaux de référence étalonnés existent.

NOTE 2 Pour une perméabilité magnétique relative supérieure à 2, un matériau de référence ne peut pas être étalonné à l'aide de la présente Norme écrite. Cela fait l'objet d'une note dans le rapport d'essai pour expliquer que les valeurs mesurées en utilisant la méthode utilisant une balance magnétique sont uniquement données à titre indicatif.

La méthode utilisant un solénoïde est la méthode de référence. La méthode utilisant le moment magnétique décrite est principalement utilisée pour mesurer la perméabilité magnétique relative des étalons de masse.

Deux méthodes de comparaison utilisées par l'industrie sont décrites. Celles-ci peuvent être étalonnées en utilisant des matériaux de référence pour lesquels la perméabilité magnétique relative a été déterminée en utilisant la méthode de référence. Si elle est appropriée, la méthode utilisant le moment magnétique peut également être utilisée. Les dimensions du matériau de référence nécessitent de faire l'objet d'une attention particulière dans le cadre de la détermination de l'incertitude de la valeur d'étalonnage en raison des effets d'auto-désaimantation. Se reporter à l'Annexe A pour plus d'informations sur la correction de l'auto-désaimantation.

2 Références normatives

Les documents suivants sont cités en référence de manière normative, en intégralité ou en partie, dans le présent document et sont indispensables pour son application. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

IEC 60050 (toutes les parties), *Vocabulaire Électrotechnique International* (disponible sur <http://www.electropedia.org/>)

Guide ISO/IEC 98-3:2008, *Incertitude de mesure – Partie 3: Guide pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUM:1995)*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions donnés dans la IEC 60050-221 et l'IEC 60050-121, ainsi que les suivants, s'appliquent.

3.1

autodésaimantation

génération d'un champ magnétique dans un corps aimanté qui s'oppose à l'aimantation

3.2

désaimanter

amener un matériau magnétique à un état magnétiquement neutre

3.3

matériau faiblement magnétique

matériau à caractère principalement non magnétique

4 Méthode utilisant un solénoïde et méthode utilisant le moment magnétique

4.1 Généralités

Les méthodes décrites à l'Article 4 sont des méthodes de référence pour déterminer la perméabilité magnétique relative des éprouvettes de matériaux faiblement magnétiques présentant un rapport longueur sur diamètre d'au moins 10:1. Quand la perméabilité magnétique relative est inférieure à 1,2, il est possible d'utiliser une bobine de détection de moment et une éprouvette de rapport longueur sur diamètre de 1:1. Les deux méthodes utilisent un équipement similaire et impliquent des calculs similaires pour déterminer la perméabilité magnétique relative. Les descriptions des deux méthodes sont donc présentées ensemble ici avec des différences significatives expliquées dans le texte.

4.2 Principe

La perméabilité magnétique relative d'une éprouvette faiblement magnétique est déterminée à partir de la polarisation magnétique J et de l'intensité du champ magnétique mesurée correspondante H en utilisant le circuit représenté à la Figure 1 ou à la Figure 5, avec

$$\mu_r = 1 + \frac{J}{\mu_0 H} \quad (1)$$

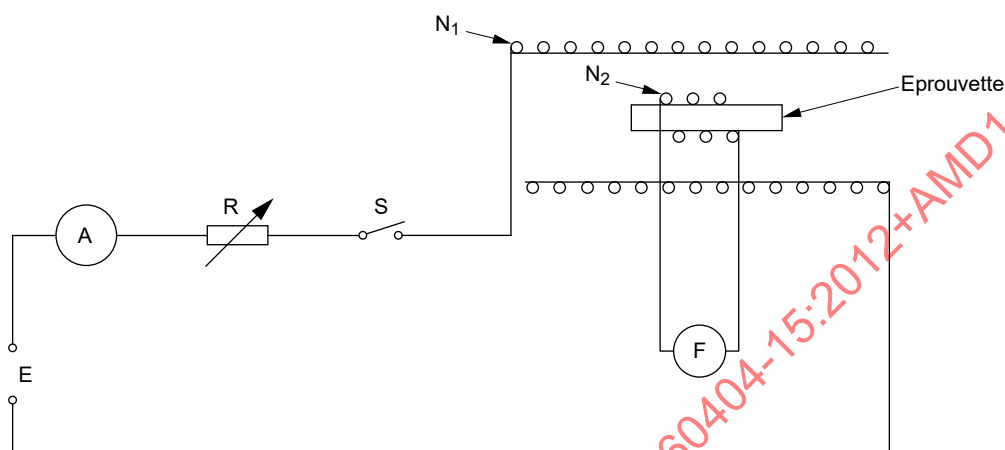
où

μ_r est la perméabilité magnétique relative de l'éprouvette (rapport);

μ_0 est la constante magnétique ($4\pi \times 10^{-7}$) (en H/m);

J est la polarisation magnétique (en T);

H est l'intensité du champ magnétique (calculée à partir du courant d'aimantation et du rapport entre l'intensité du champ magnétique et le courant (constante de bobinage) pour le solénoïde) (en A/m).



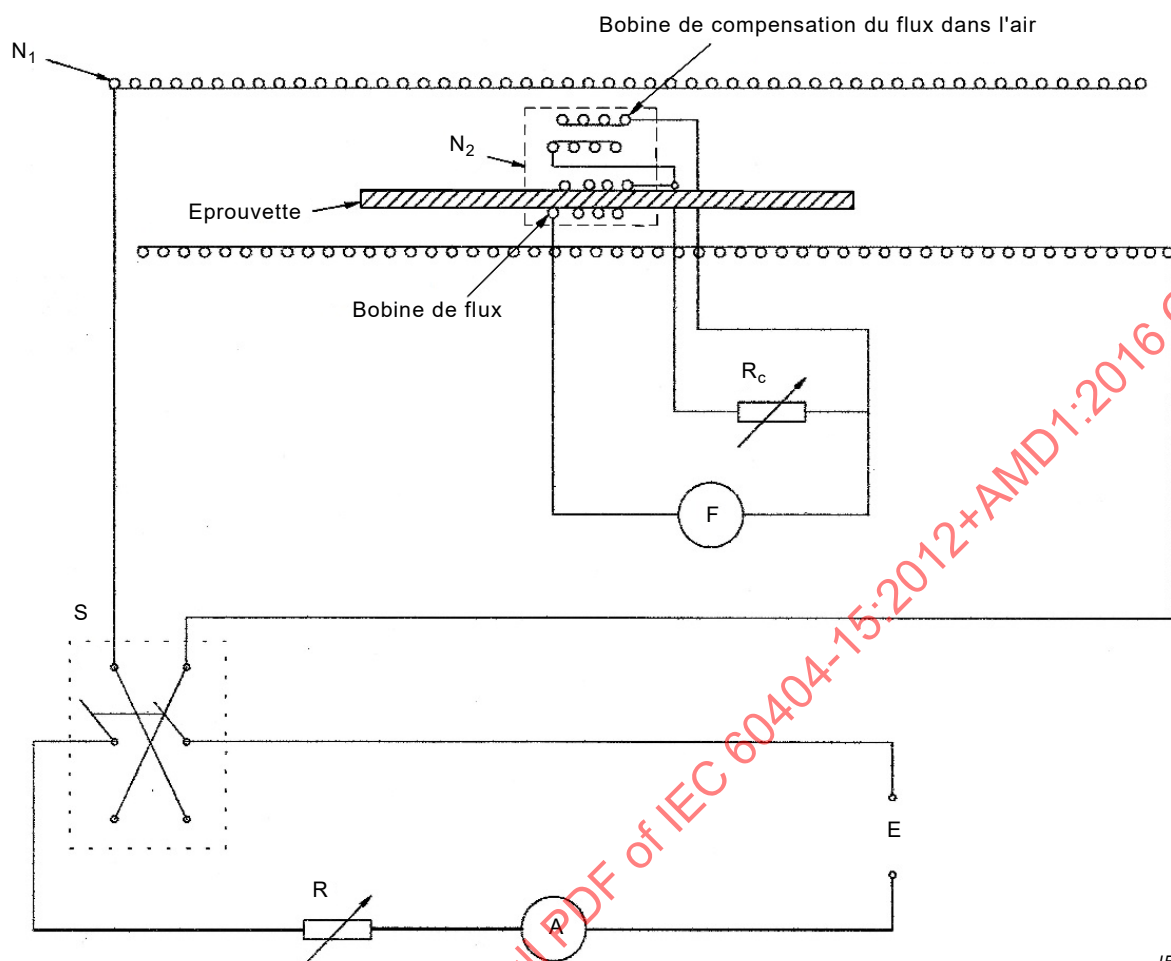
IEC 1691/12

Légende

- A appareil de mesure de courant ou ampèremètre
- E alimentation en courant continu
- F intégrateur de flux
- N_1 solénoïde
- N_2 bobine de détection ou bobine de détection de moment magnétique
- R résistance variable (commandant le courant d'aimantation)
- S interrupteur

**Figure 1 – Schéma de circuit de la méthode utilisant un solénoïde
avec retrait de l'éprouvette**

NOTE Dans la Figure 1, la bobine de détection N_2 est remplacée par une bobine de détection de moment pour la méthode utilisant le moment magnétique.



IEC

Légende

- A Appareil de mesure de courant ou ampèremètre
- E Alimentation en courant continu
- F Intégrateur de flux
- N_1 Solénoïde
- N_2 Bobine de détection compensée
- R Résistance variable (commandant le courant d'aimantation)
- R_c Résistance variable (pour ajuster la valeur de sortie de la bobine de compensation du flux d'air)
- S Interrupteur pour inverser le courant dans le solénoïde

Figure 5 – Schéma de circuit de la méthode utilisant un solénoïde avec inversion du courant d'aimantation

4.3 Appareillage

4.3.1 Solénoïde. Le rapport longueur sur diamètre du solénoïde doit être supérieur ou égal à 10:1 ou, dans le cas d'une longueur inférieure, le solénoïde doit comporter des bobines coaxiales supplémentaires aux extrémités ou doit être composé d'un système de paire de bobines séparées (Garrett [2]). Les deux derniers systèmes de bobines doivent présenter au moins le même degré d'homogénéité de champ au centre comme ce qui est obtenu avec le solénoïde long. Ces bobines doivent être réalisées sur des supports non magnétiques et non conducteurs. L'enroulement doit avoir un nombre suffisant de spires pour être capable de transporter un courant qui produira une intensité de champ magnétique de 100 kA/m. Le

rapport entre le champ magnétique et le courant du solénoïde (connu sous le nom de constante de bobinage) doit être déterminé avec une incertitude de $\pm 0,5 \%$ ou meilleure, par un étalonnage indépendant ou, comme alternative, en mesurant l'intensité du champ magnétique au moyen d'une sonde à effet Hall étalonnée et en mesurant le courant d'aimantation correspondant (à l'aide de la méthode décrite en 4.3.5).

NOTE 1 Plus d'un solénoïde (ou système de paire de bobines fendues) peut s'avérer nécessaire pour couvrir la gamme complète d'intensité de champ magnétique.

NOTE 2 Le diamètre optimal du solénoïde dépend du diamètre des éprouvettes à mesurer et de la sensibilité de la technique de mesure. Pour des mesures sur des barres pouvant atteindre 30 mm de diamètre ayant une perméabilité magnétique relative de 1,005, le diamètre interne du solénoïde serait d'environ 80 mm pour accueillir la bobine de détection voulue.

4.3.2 Bobine de détection de la méthode utilisant un solénoïde avec retrait de l'éprouvette. Pour la méthode utilisant un solénoïde avec retrait de l'éprouvette, la bobine de détection doit être réalisée sur un support non magnétique et non conducteur. Typiquement, pour des éprouvettes dont le diamètre peut atteindre 30 mm, le diamètre interne de l'ouverture dans la bobine de détection est 32 mm pour permettre d'insérer et de retirer librement les éprouvettes. La longueur de l'enroulement doit être de 40 mm; des flasques d'extrémité de diamètre compris entre 75 mm et 80 mm doivent être installées sur le support. Par exemple, l'enroulement peut comporter 10 000 spires de fil isolé de 0,2 mm de diamètre avec entrelacement si nécessaire.

NOTE L'enroulement peut comporter des connecteurs à intervalles pour faciliter l'ajustement de la sensibilité du système de mesure dans les cas de détermination la perméabilité magnétique relative des éprouvettes dans la partie la plus élevée de la gamme de perméabilité.

4.3.7 Bobine de détection de la méthode utilisant un solénoïde avec inversion du courant d'aimantation. Pour la méthode utilisant un solénoïde avec inversion du courant d'aimantation, la bobine de flux et la bobine de compensation du flux dans l'air doivent chacune être réalisées sur un support non magnétique et non conducteur. La section de la bobine de flux ne doit pas être supérieure à dix fois celle de l'éprouvette et il doit y avoir un nombre suffisant de spires pour une résolution adéquate (généralement $>1\,000$ spires). Il convient que la longueur de la bobine de flux ne soit pas supérieure à 20 % de celle de l'éprouvette.

La bobine de flux et la bobine de compensation du flux dans l'air sont connectées en opposition de série pour former une bobine de détection compensée. La longueur et les spires effectives de la bobine de flux et de la bobine de compensation du flux dans l'air doivent être quasiment égales, les spires de la bobine de compensation du flux dans l'air étant légèrement plus grandes que celles de la bobine de flux, de telle sorte que le signal de compensation puisse être atténué avec une résistance variable (R_c à la Figure 5), afin de correspondre au signal provenant de la bobine de flux vide.

La bobine de compensation du flux dans l'air doit se trouver à une distance suffisante de la bobine de flux, de telle sorte qu'il n'y ait pas de couplage significatif au flux magnétique de l'éprouvette. Le couplage modifiera l'efficacité de la compensation lorsqu'un échantillon est présent, et peut entraîner une erreur de mesure significative.

Le signal provenant de la bobine de compensation du flux dans l'air doit être ajusté pour annuler exactement le signal provenant de la bobine de flux vide. En l'absence d'échantillon, appliquer le courant d'aimantation le plus élevé à utiliser lors de l'essai, réinitialiser l'intégrateur de flux, inverser le courant d'aimantation et ajuster la résistance variable R_c pour obtenir la valeur de sortie minimale depuis la bobine compensée N_2 . Répéter si nécessaire jusqu'à ce que la valeur de sortie soit aussi faible que le réglage le permette.

4.3.3 Bobine de détection de moment. Pour des cylindres droits beaucoup plus courts présentant un rapport longueur sur diamètre de 1:1, une bobine de détection de moment avec une sensibilité homogène sur le volume de l'éprouvette doit être utilisée pour mesurer le

moment du dipôle magnétique du cylindre (voir Figure 2). La polarisation magnétique est calculée par:

$$J = \frac{j}{V} \quad (2)$$

où

J est la polarisation magnétique (en T);

j est le moment du dipôle magnétique (en Wbm);

V est le volume de l'éprouvette (en m³).

La bobine de détection de moment peut être un solénoïde avec des enroulements d'homogénéisation supplémentaires proches des extrémités de la bobine.

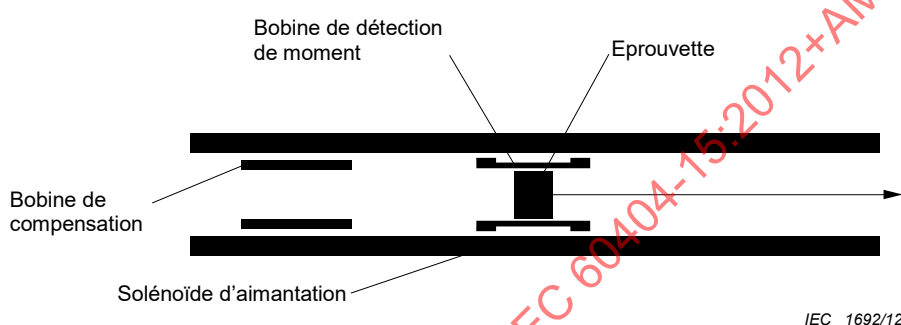


Figure 2 – Système de bobines pour la détermination du moment du dipôle magnétique

La mesure du moment magnétique de courts cylindres avec un rapport longueur sur diamètre de 1:1 doit être limitée aux matériaux ayant une perméabilité relative inférieure à $\mu_r = 1,2$. Si cette condition n'est pas satisfaite, l'intensité du champ magnétique à l'intérieur de l'éprouvette et la polarisation deviennent hétérogènes et cela produira des erreurs importantes sur le résultat de la mesure de la perméabilité magnétique.

Dans la région où μ_r est comprise entre 1,003 et 1,2, il est approprié d'apporter une correction linéaire pour l'effet du champ de désaimantation. Se reporter à l'Annexe A pour plus d'informations.

NOTE Typiquement, des poids des classes E₁, E₂ et F₁ selon la recommandation OIML R111-1 (2004) [3] entrent dans cette gamme.

Pour cette correction, l'équation (A.2) de l'Annexe A doit être utilisée ainsi que la valeur du facteur d'auto-désaimantation magnétométrique N_m obtenue à partir de la référence [6].

Par exemple, pour un échantillon cylindrique de rapport 1:1, les valeurs de la correction relative du champ magnétique appliqué pour différentes perméabilités magnétiques relatives dues à l'auto-désaimantation sont données dans le Tableau 2.

Tableau 2 – Échantillon cylindrique de rapport 1:1

μ_r	N_m	$\Delta H/H$
1,000 1	0,311 6	0,003 %
1,007	0,311 4	0,22 %
1,2	0,309 3	6,2 %

$\Delta H/H$ est la correction relative de l'intensité du champ magnétique et N_m est le facteur d'auto-désaimantation magnétométrique.

Cela est étudié plus en détail à l'Annexe A.

4.3.4 Intégrateur de flux. L'intégrateur de flux doit être un intégrateur de charge électronique ou un dispositif similaire, étalonné avec une incertitude de $\pm 0,5$ % ou meilleure.

4.3.5 Appareil de mesure du courant. L'appareil de mesure du courant doit être composé d'une résistance étalonnée connectée en série avec le circuit d'aimantation et un voltmètre numérique étalonné.

Le courant d'aimantation doit être déterminé à partir de la mesure de la tension développée aux bornes de la résistance. Les incertitudes combinées de la résistance et du voltmètre doivent être telles que le courant d'aimantation peut être déterminé avec une incertitude de $\pm 0,2$ % ou meilleure. Comme alternative, un ampèremètre étalonné avec une incertitude équivalente peut être utilisé.

4.3.6 Micromètre. Le micromètre pour mesurer les dimensions transversales de l'éprouvette pour la méthode utilisant un solénoïde doit être étalonné. Pour la méthode utilisant le moment magnétique, le volume est nécessaire et les dimensions doivent être mesurées de manière appropriée.

4.4 Éprouvette pour la méthode utilisant un solénoïde

L'éprouvette doit être composée d'une barre ronde ou rectangulaire, ou d'un certain nombre de bandes ou de fils de section supérieure ou égale à 100 mm^2 . La section maximale doit être déterminée par le diamètre de l'ouverture centrale de la bobine de détection. L'éprouvette doit pouvoir être insérée et retirée facilement sans perturber la position de la bobine de détection.

Pour éviter d'importantes erreurs introduites par l'autodésaimantation, le rapport longueur sur diamètre équivalent de l'éprouvette ne doit pas être inférieur à 10:1. Si des corrections pour l'autodésaimantation sont nécessaires, se reporter à l'Annexe A.

Par exemple, le Tableau 3 présente des valeurs pour une tige de section circulaire avec un rapport de 10:1, un diamètre de 30 mm et une bobine de détection de diamètre moyen efficace de 52,2 mm. Les corrections relatives à l'intensité de champ magnétique appliquée et à la polarisation magnétique pour différentes perméabilités magnétiques relatives dues à l'auto-désaimantation sont représentées.

Tableau 3 – Tige de section circulaire de rapport 10:1

μ_r	N_f	$\Delta H/H$	$\Delta J/J$
1,000 1	0,004 927	0,000 %	1,49 %
1,007	0,004 931	0,003 %	1,49 %
1,2	0,005 054	0,101 %	1,53 %
2	0,005 541	0,554 %	1,68 %

$\Delta H/H$ est la correction relative de l'intensité du champ magnétique, N_f est le facteur d'auto-désaimantation fluxmétrique et $\Delta J/J$ est la correction relative de la polarisation magnétique.

Cela est étudié plus en détail à l'Annexe A.

4.5 Procédure

4.5.1 Aire de la section de l'éprouvette. L'aire de la section de l'éprouvette doit être déterminée à partir d'un certain nombre de mesures de chacune des dimensions. Pour une éprouvette pour la méthode utilisant un solénoïde, le diamètre ou les dimensions transversales doit être mesuré au moyen d'un micromètre étalonné (voir 4.3.6) à des intervalles d'environ 10 mm le long des 40 mm du centre de la longueur. L'aire de la section moyenne, en mètres carrés, doit être calculée à partir des dimensions moyennes, avec une incertitude de $\pm 0,5 \%$. La différence entre la plus grande et la plus petite section ne doit pas dépasser $\pm 0,5 \%$ de la section moyenne.

Pour une éprouvette pour la méthode utilisant le moment magnétique, la détermination du volume est nécessaire et des mesures dimensionnelles suffisantes doivent être prises de sorte que cela puisse être déterminé avec une incertitude de $\pm 0,71 \%$ (c'est la racine carrée de la somme des carrés de $0,5 \%$ pour la section et de $0,5 \%$ pour la longueur.)

4.5.2 Etalonnage de l'intégrateur de flux. L'étalonnage de l'intégrateur de flux doit être établi avec une incertitude de $\pm 0,5 \%$ ou meilleure. Pour cela, l'enroulement secondaire d'un inducteur mutuel étalonné est connecté en série avec la bobine de détection et l'intégrateur de flux et le courant circulant dans l'enroulement primaire de l'inducteur mutuel est modifié pour donner la variation de flux magnétique requise. À partir de la valeur lue sur l'intégrateur, l'équation (3) est utilisée pour déterminer la constante d'étalonnage de l'intégrateur.

$$k\Phi_{IR} = M\Delta I \quad (3)$$

où

k est la constante d'étalonnage de l'intégrateur de flux;

Φ_{IR} est l'indication de l'intégrateur de flux (en Wb);

M est l'inductance mutuelle pour l'étalonnage (en H);

ΔI est la variation du courant primaire dans l'inducteur mutuel (en A).

NOTE Il est important que la résistance d'enroulement totale à l'entrée de l'intégrateur soit la même pour l'étalonnage et les mesures sur l'éprouvette. Pour éviter la possibilité de couplage entre la bobine de détection ou la bobine de moment et l'inducteur mutuel, une résistance non inductive équivalente au secondaire de l'inducteur mutuel peut être placée en série avec la bobine de détection ou la bobine de moment.

4.5.3 Désaimantation de l'éprouvette. L'éprouvette doit être désaimantée juste avant la mesure à partir d'une intensité de champ magnétique d'au moins 20 kA/m par l'inversion lente d'un courant continu ou alternatif régulièrement décroissant (pour la fréquence, voir le prochain alinéa), à condition que le champ magnétique produit par ce courant puisse pénétrer complètement l'éprouvette. Les éprouvettes qui ont été soumises à un champ magnétique plus intense doivent être désaimantées avant la mesure à partir d'un champ magnétique suffisamment élevé. L'efficacité de la désaimantation doit être vérifiée en insérant l'éprouvette dans la bobine de détection ou dans la bobine de détection de moment, sans qu'aucun courant ne circule, en retirant l'éprouvette et en observant la valeur affichée sur l'intégrateur de flux. La valeur affichée sur l'intégrateur de flux doit être nulle ou très proche de zéro.

Afin que le champ magnétique pénètre complètement l'éprouvette, la fréquence d'inversion ne doit pas dépasser 0,5 Hz pour une section de 10 mm $\times$ 10 mm et 0,1 Hz pour une section de 20 mm $\times$ 20 mm. Certains matériaux peuvent également présenter des effets de viscosité magnétique de sorte que des inversions encore plus lentes soient nécessaires pour assurer une désaimantation complète. En cas de doute, l'effet des inversions plus lentes doit être comparé à l'effet des inversions plus rapides.

Le courant d'aimantation pour produire l'intensité de champ magnétique requise doit être calculé à partir du rapport entre l'intensité du champ magnétique et le courant déterminé précédemment pour le solénoïde (voir 4.3.1).

Pour les faibles valeurs d'intensité de champ magnétique, le champ magnétique terrestre peut être important. Il est recommandé que l'axe du solénoïde soit aligné dans un plan horizontal dans une normale de direction à la composante horizontale du champ magnétique terrestre.

~~La polarisation magnétique doit être mesurée en insérant l'éprouvette désaimantée dans la bobine de détection ou la bobine de détection de moment, en ajustant le courant d'aimantation sur la valeur requise en prenant soin de ne pas créer de dépassement, en mettant l'intégrateur de flux à zéro, en retirant l'éprouvette et en enregistrant la valeur de l'intégrateur. Les précautions nécessaires doivent être prises pour retirer l'éprouvette de la bobine de détection ou de la bobine de détection de moment et la mettre dans une position où il n'a plus d'influence sur la bobine de détection ou la bobine de détection de moment, comme l'indique la valeur affichée par l'intégrateur.~~

~~Pour la méthode utilisant un solénoïde, la procédure de mesure complète doit être répétée avec l'autre extrémité de l'éprouvette insérée dans la bobine de détection. Les deux valeurs de l'intégrateur doivent être moyennées ou utilisées séparément, selon les exigences du client.~~

~~La procédure est répétée selon les besoins pour déterminer la répétabilité de mesure donnée.~~

~~NOTE — De petites fluctuations du courant d'aimantation ou du champ magnétique ambiant peuvent induire de grandes instabilités du flux mesuré. Pour éviter cela, une bobine de compensation peut être utilisée.~~

~~Le poids de l'éprouvette peut légèrement modifier la direction l'axe de la bobine de détection utilisée dans la méthode utilisant un solénoïde pendant le retrait de l'éprouvette, ce qui génère une autre tension dans la bobine de détection. Par conséquent, il convient de bien fixer la bobine de détection ou de la découpler mécaniquement du mouvement de l'éprouvette.~~

~~Les charges électrostatiques de la bobine de détection ou de la bobine de moment pendant le retrait de l'éprouvette peuvent perturber les mesures de flux et il convient de les empêcher. Un blindage en cuivre peut être efficace pour éviter que le signal ne génère des charges électrostatiques.~~

4.5.4 Mesure de la polarisation magnétique avec retrait de l'éprouvette. La polarisation magnétique doit être mesurée en insérant l'éprouvette désaimantée dans la bobine de détection ou la bobine de détection de moment, en ajustant le courant d'aimantation sur la valeur requise en prenant soin de ne pas créer de dépassement, en mettant l'intégrateur de flux à zéro, en retirant l'éprouvette et en enregistrant la valeur de l'intégrateur. Les précautions nécessaires doivent être prises pour retirer l'éprouvette de la bobine de détection ou de la bobine de détection de moment et la mettre dans une position où elle n'a plus d'influence sur la bobine de détection ou la bobine de détection de moment, comme l'indique la valeur affichée par l'intégrateur.

Le poids de l'éprouvette peut légèrement modifier la direction de l'axe de la bobine de détection utilisée dans la méthode utilisant un solénoïde pendant le retrait de l'éprouvette, ce qui génère une autre tension dans la bobine de détection. Par conséquent, il convient de bien fixer la bobine de détection ou de la découpler mécaniquement du mouvement de l'éprouvette.

Les charges électrostatiques de la bobine de détection ou de la bobine de moment pendant le retrait de l'éprouvette peuvent perturber les mesures de flux et il convient de les empêcher. Un blindage en cuivre peut être efficace pour éviter que le signal ne génère des charges électrostatiques.

De petites fluctuations du courant d'aimantation ou du champ magnétique ambiant peuvent induire de grandes instabilités du flux mesuré. Pour éviter cela, une bobine de compensation peut être utilisée.

4.5.5 Mesure de la polarisation magnétique avec inversion du courant d'aimantation. La polarisation magnétique doit être mesurée en insérant l'éprouvette désaimantée au centre de la bobine de détection compensée, en ajustant le courant d'aimantation sur la valeur positive requise en prenant soin de ne pas créer de dépassement, en mettant l'intégrateur de flux à zéro, en inversant le courant d'aimantation à la même amplitude que la valeur positive en prenant soin de ne pas créer de dépassement, et en enregistrant la valeur de l'intégrateur. La valeur représente deux fois la polarisation magnétique due à l'inversion du courant.

NOTE L'utilisation d'une bobine de compensation du flux dans l'air et d'une résistance de compensation permet au flux d'air enfermé par la bobine de flux d'être annulé, de sorte que la polarisation magnétique puisse être mesurée directement (voir 4.3.7).

4.5.6 Moyennage sur les deux directions de l'échantillon. Pour la méthode utilisant un solénoïde, la procédure de mesure complète doit être réalisée deux fois, tout d'abord avec une extrémité de l'éprouvette insérée dans la bobine de détection, puis avec l'autre extrémité insérée dans la bobine de détection. Les deux valeurs de l'intégrateur doivent être moyennées ou utilisées séparément, selon les exigences du client.

4.5.7 Répétabilité. La procédure est répétée selon les besoins pour déterminer la répétabilité de mesure.

4.6 Calcul

Pour la méthode utilisant un solénoïde avec retrait de l'éprouvette, la polarisation magnétique doit être calculée à partir de l'Equation (4):

$$J = \frac{\Phi_{IR}}{NA_s} \quad J = \frac{\Phi_{IR}}{NA_s} \quad (4)$$

Pour la méthode utilisant un solénoïde avec inversion du courant d'aimantation, la polarisation magnétique doit être calculée à partir de l'Equation (7):

$$J = \frac{\Phi_{IR}}{2NA_s} \quad (7)$$

où

J est la polarisation magnétique (en T);

Φ_{IR} est la valeur de l'intégrateur de flux corrigée conformément à l'étalonnage de l'intégrateur (en Wb);

A_s est la section de l'éprouvette (en m²);

N est le nombre de spires de la bobine de détection.

Pour la méthode utilisant le moment magnétique, le moment du dipôle magnétique doit être calculé à partir de l'équation (5):

$$j = \Phi_{IR} \cdot \left(\frac{H}{I} \right)^{-1} \quad (5)$$

où

j est le moment du dipôle magnétique (en Wbm);

Φ_{IR} est la valeur de l'intégrateur de flux corrigée conformément à l'étalonnage de l'intégrateur (en Wb);

H/I est la constante de bobinage (rapport entre l'intensité de champ magnétique et le courant) du système de bobine de moment (en (A/m)/A).

La polarisation magnétique, J , doit alors être calculée en utilisant l'équation (2).

Si nécessaire, se reporter à l'Annexe A pour le calcul des corrections pour l'auto-désaimantation. Dans ce cas, la perméabilité magnétique relative de l'éprouvette doit être calculée à partir de l'équation suivante:

$$\mu_r = 1 + \frac{J}{\mu_0 H} \quad (6)$$

où

μ_r est la perméabilité magnétique relative de l'éprouvette (rapport);

μ_0 est la constante magnétique ($4\pi \times 10^{-7}$) (en H/m);

J est la polarisation magnétique (en T);

H est l'intensité du champ magnétique (en A/m) (calculée à partir du courant d'aimantation et de la constante d'enroulement du solénoïde).

4.7 Incertitudes

L'estimation des incertitudes sur les mesures associées à la méthode utilisant un solénoïde et à la méthode utilisant le moment magnétique doit être divisée en trois éléments: l'incertitude de la mesure de la polarisation magnétique (J), l'incertitude de la mesure de l'intensité du champ magnétique (H) et, à partir de ces deux premières, la détermination de l'incertitude de la perméabilité magnétique relative moins 1 ($\mu_r - 1$). A partir de ces trois éléments, l'incertitude absolue dans la perméabilité magnétique relative (μ_r) doit être déterminée. Si des corrections ont été appliquées pour la désaimantation, une contribution doit être apportée au bilan des incertitudes.

Les contributions individuelles à ces incertitudes doivent être déterminées, puis combinées selon les directives du Guide ISO/IEC pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUIDE ISO/IEC 98-3:2008).

5 Méthode de la balance magnétique

5.1 Principe

Il s'agit d'une méthode de comparaison qui permet de déterminer facilement la perméabilité magnétique relative d'un matériau qui est soit "inférieure", soit "supérieure" à celle de disques.

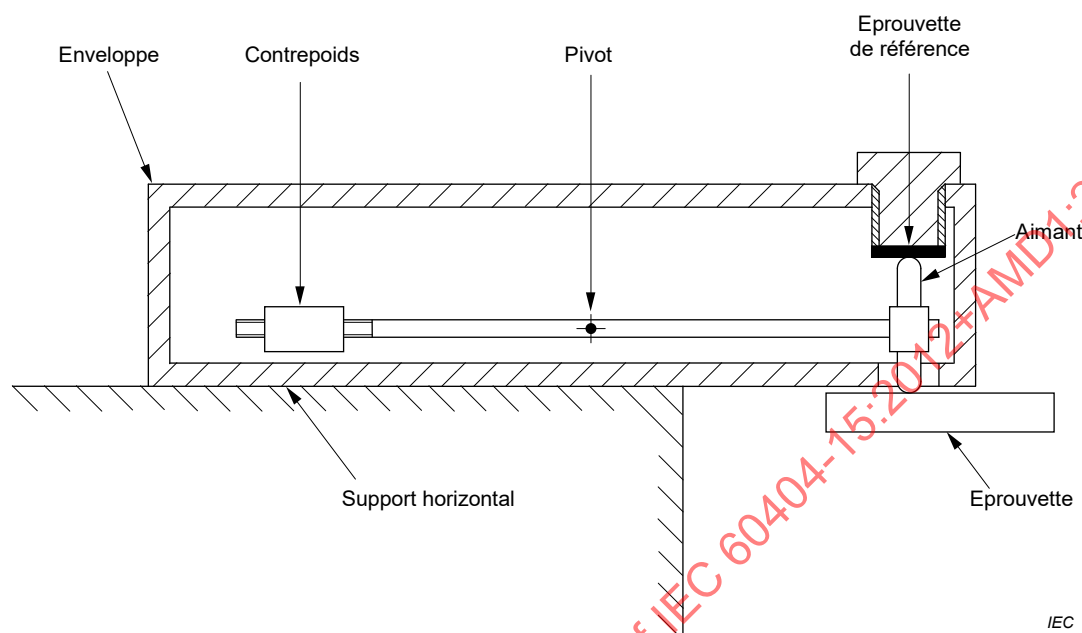
La balance magnétique est conçue pour déterminer la perméabilité magnétique relative de petites éprouvettes et composants, qui ne peuvent pas être mesurés par la méthode de référence. En outre, cette méthode est utile pour les mesures sur site et in situ, sur des matériaux et des ensembles complets.

La perméabilité magnétique relative est déterminée en comparant l'attraction d'un aimant, soit par une série de disques, soit par l'éprouvette en essai en utilisant des instruments du commerce comme cela est représenté sur la Figure 3. Voir 5.2 pour plus d'informations sur les disques et les matériaux.

L'aimant est soit attiré par un disque vissé en haut de l'instrument au-dessus de l'aimant, soit par l'éprouvette placée sous l'aimant, en fonction du matériau qui présente la perméabilité magnétique relative efficace la plus élevée. Certains types de disques sont équipés d'une vis sans tête ferromagnétique placée dans le couvercle. Cette vis est réglée par le fabricant pour

produire des valeurs spécifiques de perméabilité magnétique relative efficace au point où l'aimant entre en contact avec un disque métallique de perméabilité magnétique très basse.

NOTE 1 Pour les limitations sur la dépendance entre la perméabilité magnétique relative et l'intensité du champ magnétique indiquée, voir l'Introduction de la présente norme.



IEC 1693/12

Figure 3 – Balance magnétique vue de côté

NOTE 2 Cet instrument existe sous d'autres formes. Un tel instrument est équipé d'un ressort en spirale en bronze phosphoreux attaché au pivot central et à un bouton à indice dont les divisions d'échelle sont arbitraires. Dans ce cas, l'intensité requise pour détacher l'aimant d'un matériau de référence, telle qu'indiquée par l'échelle, est comparée à celle pour l'éprouvette en essai. Un autre type d'instrument utilise une jauge de contrainte pour mesurer cette force. Le reste de cette section porte seulement sur l'utilisation des disques. Pour les autres types d'instruments, ces disques peuvent être remplacés par des matériaux de référence étalonnés.

5.2 Disques et matériaux de référence

5.2.1 Une série de disques (fournis avec la balance) couvrant la gamme de perméabilité magnétique relative allant de 1,005 à 5 peut être utilisée (voir 5.1).

La perméabilité magnétique relative des disques est évaluée en utilisant un certain nombre de matériaux de référence étalonnés. Les disques de perméabilité magnétique relative nominale supérieure à 2 ne peuvent pas être évalués.

Pour une perméabilité magnétique relative supérieure à 2, un matériau de référence ne peut pas être étalonné à l'aide de la présente norme. Il convient que cela fasse l'objet d'une note dans le rapport d'essai pour expliquer que les valeurs mesurées en utilisant la méthode utilisant une balance magnétique sont uniquement données à titre indicatif.

Il convient d'étalonner les matériaux de référence sous forme de tige composée d'un certain nombre de petits cylindres de matériau similaire par la méthode utilisant un solénoïde ou la méthode utilisant le moment magnétique. Il convient alors d'utiliser des cylindres individuels pour vérifier la perméabilité magnétique relative approximative du disque.

NOTE Les matériaux de référence ou les disques peuvent être envoyés à des laboratoires nationaux de mesure qui proposent cet étalonnage.

5.3 Éprouvette

Les dimensions de l'éprouvette doivent être soit:

- a) 25 mm × 25 mm (ou 25 mm de diamètre) et 25 mm d'épaisseur; soit
- b) inférieures à ces dimensions, conformément à un accord entre les parties respectives.

Une face doit être lisse, plate et exempte de contamination par des machines. Puisque la perméabilité magnétique relative de la plupart des matériaux et alliages est sensible au traitement thermique et à l'usinage mécanique, les matériaux placés juste à côté des bords de coupe ne doivent pas être utilisés. Des précautions doivent être prises pour éviter les effets du durcissement et de la chaleur pendant l'usinage.

Si besoin, la finition doit être réalisée par une légère rectification avec assez de liquide de refroidissement.

NOTE Pour les éprouvettes de dimensions inférieures à 25 mm, la valeur de perméabilité mesurée peut être erronée [4]. La grandeur de cette erreur dépendra des dimensions et de la perméabilité du matériau. Les meilleurs résultats sont obtenus lorsque les matériaux d'essai et de référence ont des dimensions similaires.

5.4 Procédure

5.4.1 L'éprouvette et le matériau de référence doivent être désaimantés conformément à 4.5.3.

Si la taille ou l'emplacement de l'éprouvette ne permet pas d'effectuer la désaimantation, le rapport d'essai doit l'indiquer.

5.4.2 La balance magnétique doit être placée sur une surface horizontale avec le disque à la valeur de perméabilité magnétique relative la plus élevée en place. L'éprouvette doit être placée au-dessous de l'aimant. Si l'aimant est attiré par l'éprouvette, alors la perméabilité magnétique relative du matériau est supérieure à celle pouvant être déterminée par l'instrument. Si l'aimant est attiré par le disque, alors le disque est remplacé séquentiellement par des disques de perméabilité magnétique relative de plus en plus petite jusqu'à ce que l'aimant soit attiré par l'éprouvette.

La procédure doit être répétée plusieurs fois sur la surface de l'éprouvette pour vérifier la constance et l'uniformité de la valeur. Les mesures ne doivent pas être prises près des bords ou sur de petites zones de réentrantes.

5.5 Évaluation de la perméabilité magnétique relative

La perméabilité magnétique relative de l'éprouvette doit être prise dans la gamme entre les deux derniers disques, c'est à dire entre celui en place quand l'aimant est attiré par l'éprouvette et celui de la plus basse perméabilité pour laquelle l'aimant est attiré.

NOTE Les disques peuvent être comparés à des matériaux de référence étalonnés par des instituts nationaux de mesure qui proposent cet étalonnage.

5.6 Incertitudes

L'incertitude sur l'étalonnage des disques ou sur les matériaux de référence utilisés doit être indiquée (voir 4.7 pour l'incertitude sur la méthode utilisant un solénoïde).

NOTE Étant donné que l'instrument peut seulement déterminer la gamme dans laquelle la perméabilité magnétique relative se situe, il n'est pas possible d'attribuer une valeur d'incertitude à la mesure.

6 Méthode de l'appareil de mesure de la perméabilité

6.1 Principe

Il s'agit d'une méthode de comparaison qui permet de déterminer facilement la perméabilité magnétique relative d'un matériau.

La méthode utilisant un appareil de mesure de la perméabilité, représentée de manière schématique à la Figure 4, est appropriée pour déterminer la perméabilité relative μ_r des matériaux faiblement magnétiques comprise entre 1,0 et 2,0.

La variation de densité magnétique de flux produite dans l'air au niveau d'un pôle d'un aimant permanent est mesurée en utilisant des appareils de mesure de perméabilité du commerce, quand une éprouvette de faible perméabilité magnétique est mis en contact avec ce pôle. Les variations de densité magnétique de flux sont petites et elles sont mesurées par des sondes magnétométriques (magnétomètres à entrefer) intégrant un gradiomètre et un aimant permanent, voir Figure 4.

Quand l'instrument est étalonné conformément à des normes avec des valeurs de perméabilité connues déterminées par le fabricant de l'instrument selon ses procédures internes ou des normes nationales, les valeurs mesurées de la perméabilité relative peuvent être raccordées à des normes nationales. Ces normes peuvent également être envoyées à des laboratoires nationaux de mesure pour l'étalonnage.

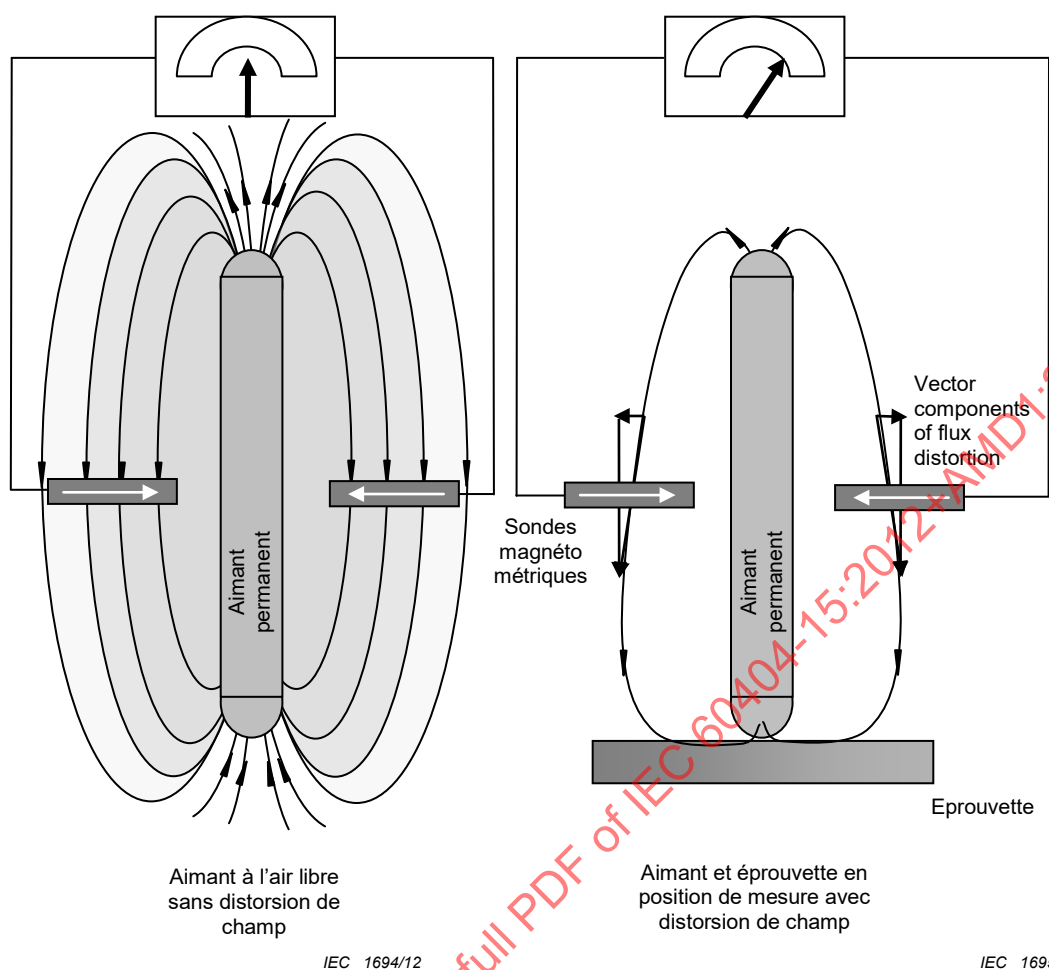


Figure 4 – Schéma de la disposition de l'appareil de mesure de la perméabilité et de la distribution du champ magnétique avec et sans éprouvette

6.2 Éprouvettes et matériaux de référence

L'instrument doit être étalonné au minimum en un point sur chaque gamme à utiliser avec le nombre approprié de matériaux de référence. Les matériaux de référence doivent être étalonnés en utilisant la méthode utilisant un solénoïde ou la méthode utilisant le moment magnétique (voir Article 4). La taille et la forme de l'échantillon de référence sont critiques et, pour les mesures absolues, elles doivent être conformes aux spécifications du fabricant de l'instrument.

NOTE Les échantillons de référence sont fournis par les fabricants d'instruments et par certains laboratoires d'étalonnage ou laboratoires nationaux de mesure. Ils peuvent être étalonnés par des laboratoires normalisés qui proposent ce genre d'étalonnage.

6.3 Éprouvette

L'éprouvette doit être conforme à 5.3.

6.4 Procédure

L'éprouvette et l'éprouvette de référence doivent être désaimantées conformément à 4.5.3.

Si la taille ou l'emplacement de l'éprouvette ne permet pas d'effectuer la désaimantation, le rapport d'essai doit l'indiquer.

La sonde doit être montée de telle sorte qu'elle ne sera pas déplacée pendant la mesure puisque de petites variations d'intensité du champ magnétique ambiant affectent le réglage du zéro de l'instrument. Sans éprouvette en place, l'instrument doit être mis à zéro selon les directives du fabricant. L'éprouvette doit être mise en contact avec l'extrémité d'un pôle de l'aimant dans la sonde et la gamme de l'appareil de mesure de la perméabilité doit être ajustée pour donner une valeur sur l'échelle et, dans la mesure du possible, la gamme doit être choisie pour donner la plus grande déviation pour offrir une bonne résolution. L'éprouvette doit être retiré, vérifié et, si besoin, le zéro de l'instrument ajusté. La mesure de l'éprouvette doit être répétée à plusieurs endroits sur des zones plates et les résultats enregistrés. L'instrument doit alors être étalonné sur la gamme utilisée avec une éprouvette de référence appropriée, voir 6.2. Les valeurs de perméabilité indiquées pour l'éprouvette doivent alors être ajustées en conséquence.

6.5 Incertitudes

L'estimation des incertitudes sur les mesures de la perméabilité magnétique relative par la méthode utilisant un appareil de mesure de la perméabilité doit être divisée en deux éléments: l'incertitude sur la valeur du matériau de référence et la résolution et la répétabilité de l'appareil de mesure de la perméabilité.

NOTE On peut rencontrer une incertitude supplémentaire si les dimensions des éprouvettes d'essai et de référence ne sont pas similaires.

Les contributions individuelles à ces incertitudes doivent alors être identifiées, puis combinées selon les directives du Guide ISO/IEC pour l'expression de l'incertitude de mesure (GUIDE ISO/IEC 98-3: 2008).

7 Rapport d'essai

Le rapport d'essai doit comporter les éléments suivants:

- une déclaration indiquant que la procédure de mesure a été réalisée conformément à la présente norme;
- la méthode utilisée;
- une note indiquant si la désaimantation a été effectuée;
- le nombre et la taille des éprouvettes soumises aux essais;
- la valeur de la perméabilité magnétique relative;
- pour la méthode utilisant un solénoïde, la valeur de l'intensité du champ magnétique appliqué;
- la température pendant la mesure;
- un rapport sur l'incertitude sur la valeur déterminée de la perméabilité magnétique relative.

Annexe A (informative)

Correction pour l'autodésaimantation

A.1 Généralités

Pour la méthode utilisant un solénoïde et la méthode utilisant le moment magnétique, des corrections seront nécessaires pour l'autodésaimantation.

Le Paragraphe 4.3.3 donne des exemples de valeurs de correction relative pour la méthode utilisant le moment magnétique.

Le Paragraphe 4.4 donne des exemples de valeurs de correction relative pour la méthode utilisant un solénoïde.

Les calculs permettant de déterminer ces valeurs de correction sont présentés dans cette annexe.

A.2 Méthode utilisant un solénoïde

Quand le rapport longueur sur diamètre équivalent de l'éprouvette est inférieur à 10:1, une correction pour l'auto-désaimantation peut être nécessaire.

Une correction, ΔJ (en T), de la polarisation mesurée est déterminée à partir de l'équation (A.1):

$$\Delta J = \frac{A_W}{A_S} N_f J \quad (\text{A.1})$$

où

N_f est le facteur de désaimantation fluxmétrique/balistique [5,6];

A_W est la section efficace de la bobine de détection (en m²);

A_S est la section de l'éprouvette (en m²);

J est la polarisation magnétique (en T).

Une correction, ΔH (en A/m), de l'intensité de champ magnétique appliquée est déterminée à partir de l'équation (A.2):

$$\Delta H = -\frac{N_f J}{\mu_0} \quad (\text{A.2})$$

où

μ_0 est la constante magnétique ($4\pi \times 10^{-7}$) (en H/m).

La polarisation magnétique corrigée J et l'intensité de champ magnétique appliquée H sont utilisées dans l'équation (6) pour déterminer la perméabilité magnétique relative.

Quand une correction pour l'autodésaimantation est apportée, une contribution d'incertitude doit être incluse et elle doit être déterminée pour chaque mesure.

L'équation (A.1) s'applique seulement quand le flux de retour par la bobine de détection est homogène. Il convient de l'utiliser pour les éprouvettes qui satisfont aux conditions données en 4.4 et pour les solénoïdes dont la distance entre l'échantillon et l'enroulement est petite (voir 4.3.2). Toutefois, pour des échantillons plus courts ou pour des bobines dont l'espace entre l'échantillon et l'enroulement est plus grand, il convient de prendre le profil non homogène du champ de désaimantation en considération. Une telle correction peut être apportée par un calcul numérique du champ de désaimantation.

A.3 Méthode du moment magnétique

Une correction, ΔH (en A/m), de l'intensité de champ magnétique appliquée est déterminée à partir de l'équation (A.3):

$$\Delta H = - \frac{N_m J}{\mu_0} \quad (\text{A.3})$$

où

N_m est le facteur de désaimantation magnétométrique [6].

La polarisation magnétique corrigée J et l'intensité de champ magnétique appliquée H sont utilisées dans l'équation (6) pour déterminer la perméabilité magnétique relative.

Quand une correction pour l'autodésaimantation est apportée, une contribution d'incertitude doit être incluse et elle doit être déterminée pour chaque mesure.

NOTE Pour des perméabilités magnétiques relatives supérieures à 1,2, le champ magnétique à l'intérieur de l'éprouvette et la polarisation de l'éprouvette deviennent non homogènes et entraînent des erreurs importantes.

Bibliographie

- [1] HALL, M.J., DRAKE, A.E., HARMON S.A.C. and AGER, C.I., Low permeability reference standards with improved high magnetic field strength performance. IEE Proceedings – Scientific Measurement Technology, 1988, 145(4), 181-183
- [2] GARRETT, M.W.: Axially symmetric system for generating and measuring magnetic field. Partie 1: J.Appl.Phys. 22(1951), 1091-1107
- [3] OIML R111-1 (2004): weight of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3
- [4] HALL, M.J., DRAKE, A.E., HENDERSON, L.C.A., Guidance notes for use with NPL low permeability reference standards, NPL Report CEM 12, March 1999
- [5] JOSEPH, R.I., Ballistic demagnetizing factor in uniformly magnetized cylinders. J App Phys, 1966, Vol. 37 No. 13, pp 4639-4643
- [6] CHEN, D.-X., BRUG, J.A., GOLDFARB, R.B., "Demagnetizing Factors for Cylinders", IEEE Trans. Mag. 27 (1991) pp 3601-3619
- [7] EN 12163, *Cuivre et alliages de cuivre – Barres pour usages généraux*
- [8] EN 10088-1, *Aciers inoxydables – Partie 1: Liste des aciers inoxydables*

FINAL VERSION**VERSION FINALE****Magnetic materials –****Part 15: Methods for the determination of the relative magnetic permeability of feebly magnetic materials****Matériaux magnétiques –****Partie 15: Méthodes de détermination de la perméabilité magnétique relative des matériaux faiblement magnétiques**

CONTENTS

FOREWORD	3
INTRODUCTION	5
1 Scope	6
2 Normative references	6
3 Terms and definitions	7
4 Solenoid and magnetic moment method	7
4.1 General	7
4.2 Principle	7
4.3 Apparatus	9
4.4 Test specimen for the solenoid method	12
4.5 Procedure	13
4.6 Calculation	14
4.7 Uncertainty	15
5 Magnetic balance method	16
5.1 Principle	16
5.2 Disc inserts and reference materials	17
5.3 Test specimen	17
5.4 Procedure	17
5.5 Evaluation of the relative magnetic permeability	18
5.6 Uncertainty	18
6 Permeability meter method	18
6.1 Principle	18
6.2 Reference specimens and materials	19
6.3 Test specimen	19
6.4 Procedure	19
6.5 Uncertainty	20
7 Test report	20
Annex A (informative) Correction for self-demagnetization	21
Bibliography	23
Figure 1 – Circuit diagram for the solenoid method with withdrawal of test specimen	8
Figure 2 – Coil system for the determination of the magnetic dipole moment	11
Figure 3 – Magnetic balance: side view	16
Figure 4 – Schematic of the permeability meter arrangement and magnetic field distribution without and with test specimen	19
Figure 5 – Circuit diagram for the solenoid method with reversing of magnetizing current	9
Table 1 – Relative magnetic permeability ranges for the methods described	6
Table 2 – Cylindrical sample with a 1:1 aspect ratio	11
Table 3 – Circular cross section rod with an aspect ratio of 10:1	12

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MAGNETIC MATERIALS –

Part 15: Methods for the determination of the relative magnetic permeability of feebly magnetic materials

FOREWORD

- 1) The International Electrotechnical Commission (IEC) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of IEC is to promote international co-operation on all questions concerning standardization in the electrical and electronic fields. To this end and in addition to other activities, IEC publishes International Standards, Technical Specifications, Technical Reports, Publicly Available Specifications (PAS) and Guides (hereafter referred to as “IEC Publication(s)”). Their preparation is entrusted to technical committees; any IEC National Committee interested in the subject dealt with may participate in this preparatory work. International governmental and non-governmental organizations liaising with the IEC also participate in this preparation. IEC collaborates closely with the International Organization for Standardization (ISO) in accordance with conditions determined by agreement between the two organizations.
- 2) The formal decisions or agreements of IEC on technical matters express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the relevant subjects since each technical committee has representation from all interested IEC National Committees.
- 3) IEC Publications have the form of recommendations for international use and are accepted by IEC National Committees in that sense. While all reasonable efforts are made to ensure that the technical content of IEC Publications is accurate, IEC cannot be held responsible for the way in which they are used or for any misinterpretation by any end user.
- 4) In order to promote international uniformity, IEC National Committees undertake to apply IEC Publications transparently to the maximum extent possible in their national and regional publications. Any divergence between any IEC Publication and the corresponding national or regional publication shall be clearly indicated in the latter.
- 5) IEC itself does not provide any attestation of conformity. Independent certification bodies provide conformity assessment services and, in some areas, access to IEC marks of conformity. IEC is not responsible for any services carried out by independent certification bodies.
- 6) All users should ensure that they have the latest edition of this publication.
- 7) No liability shall attach to IEC or its directors, employees, servants or agents including individual experts and members of its technical committees and IEC National Committees for any personal injury, property damage or other damage of any nature whatsoever, whether direct or indirect, or for costs (including legal fees) and expenses arising out of the publication, use of, or reliance upon, this IEC Publication or any other IEC Publications.
- 8) Attention is drawn to the Normative references cited in this publication. Use of the referenced publications is indispensable for the correct application of this publication.
- 9) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this IEC Publication may be the subject of patent rights. IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

DISCLAIMER

This Consolidated version is not an official IEC Standard and has been prepared for user convenience. Only the current versions of the standard and its amendment(s) are to be considered the official documents.

This Consolidated version of IEC 60404-15 bears the edition number 1.1. It consists of the first edition (2012-09) [documents 68/442/FDIS and 68/443/RVD] and its amendment 1 (2016-12) [documents 68/531/CDV and 68/544/RVC]. The technical content is identical to the base edition and its amendment.

This Final version does not show where the technical content is modified by amendment 1. A separate Redline version with all changes highlighted is available in this publication.

International Standard IEC 60404-15 has been prepared by IEC technical committee 68: Magnetic alloys and steels.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 2.

A list of all the parts in the IEC 60404 series, under the general title *Magnetic materials*, can be found on the IEC website.

The committee has decided that the contents of the base publication and its amendment will remain unchanged until the stability date indicated on the IEC web site under "<http://webstore.iec.ch>" in the data related to the specific publication. At this date, the publication will be

- reconfirmed,
- withdrawn,
- replaced by a revised edition, or
- amended.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-15:2012+AMD1:2016 CSV

INTRODUCTION

The determination of the relative magnetic permeability of feebly magnetic materials is often required to assess their effect on the ambient magnetic field. Typical feebly magnetic materials are austenitic stainless steels and "non-magnetic" brass.

The relative magnetic permeability of some of these materials can vary significantly with the applied magnetic field strength. In the majority of cases, these materials find application in the ambient earth's magnetic field. This field in Europe is 35 A/m to 40 A/m, in the far East, it is 25 A/m to 35 A/m and in North America, it is 25 A/m to 35 A/m. However, at present, methods of measurement are not available to determine the relative magnetic permeability of feebly magnetic materials at such a low value of magnetic field strength.

Studies of the properties of feebly magnetic materials have been carried out, primarily with a view to the production of improved reference materials. These studies have shown [1]¹ that it is possible to produce reference materials which have a substantially constant relative magnetic permeability over the range from the earth's magnetic field to at least a magnetic field strength of 100 kA/m.

Since conventional metallic materials can also be used as reference materials their relative magnetic permeability can be determined using the reference method. It is important that the magnetic field strength used during the determination of the relative magnetic permeability is stated for all materials but in particular for conventional materials since the changes with applied magnetic field can be large. This behaviour also needs to be considered when using reference materials made from conventional materials to calibrate comparator methods. This is because these methods use magnetic fields that vary through the volume of the material being tested and this makes it difficult to know the relative magnetic permeability to use for the calibration.

Where the effect of a feebly magnetic material on the ambient earth's magnetic field is critical, the direct measurement of this effect using a sensitive magnetometer should be considered.

¹ Figures in square brackets refer to the bibliography.

MAGNETIC MATERIALS –

Part 15: Methods for the determination of the relative magnetic permeability of feebly magnetic materials

1 Scope

This part of IEC 60404 specifies a solenoid method, a magnetic moment method, a magnetic balance method and a permeability meter method for the determination of the relative magnetic permeability of feebly magnetic materials (including austenitic stainless steel). The magnetic balance and permeability meter methods are both comparison methods calibrated using reference materials to determine the value of the relative magnetic permeability of the test specimen. The relative magnetic permeability range for each of these methods is shown in Table 1. The methods given are for applied magnetic field strengths of between 5 kA/m and 100 kA/m.

Table 1 – Relative magnetic permeability ranges for the methods described

Measurement method	Relative magnetic permeability range
Solenoid	1,003 to 2
Magnetic moment	1,003 to 1,2
Magnetic balance	1,003 to 5
Permeability meter	1,003 to 2

NOTE 1 The relative magnetic permeability range given for the magnetic balance method covers the inserts provided with a typical instrument. These can only be assessed at values for which calibrated reference materials exist.

NOTE 2 For a relative magnetic permeability larger than 2, a reference material cannot be calibrated using this written standard. A note of this is given in the test report explaining that the values measured using the magnetic balance are for indication only.

The solenoid method is the reference method. The magnetic moment method described is used mainly for the measurement of the relative magnetic permeability of mass standards.

Two comparator methods used by industry are described. These can be calibrated using reference materials for which the relative magnetic permeability has been determined using the reference method. When suitable, the magnetic moment method can also be used. The dimensions of the reference material need to be given careful consideration when determining the uncertainty in the calibration value due to self-demagnetization effects. See Annex A for more information on correcting for self-demagnetization.

2 Normative references

The following documents, in whole or in part, are normatively referenced in this document and are indispensable for its application. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

IEC 60050 (all parts), *International Electrotechnical Vocabulary* (available at <http://www.electropedia.org/>)

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions given in IEC 60050-221, IEC 60050-121 as well as the following apply.

3.1

self-demagnetization

generation of a magnetic field within a magnetized body that opposes the magnetization

3.2

demagnetize

to bring a magnetic material to a magnetically neutral state

3.3

feebly magnetic material

material that is essentially non-magnetic in character

4 Solenoid and magnetic moment method

4.1 General

The methods that are described in Clause 4 are reference methods for determining the relative magnetic permeability of test specimens of feebly magnetic materials with a length to diameter ratio of at least 10:1. When the relative magnetic permeability is less than 1,2, it is possible to use a moment detection coil and a test specimen with a length to diameter ratio of 1:1. Both methods use similar equipment and involve similar calculations to determine the relative magnetic permeability. The descriptions of both methods are therefore presented together here with significant differences explained in the text.

4.2 Principle

The relative magnetic permeability of a feebly magnetic test specimen is determined from the magnetic polarization J and the corresponding magnetic field strength H measured using the circuit shown in Figure 1 or Figure 5, using

$$\mu_r = 1 + \frac{J}{\mu_0 H} \quad (1)$$

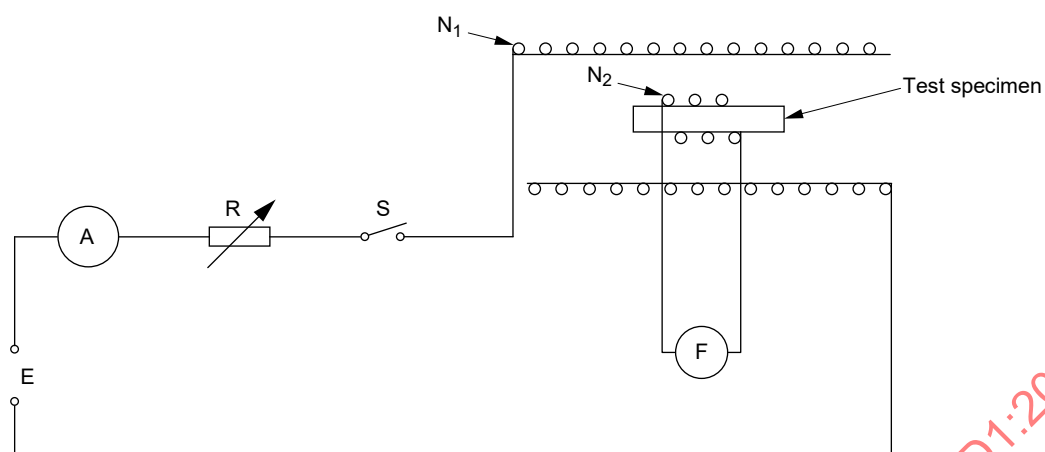
where

μ_r is the relative magnetic permeability of the test specimen (ratio);

μ_0 is the magnetic constant ($4\pi \times 10^{-7}$) (in H/m);

J is the magnetic polarization (in T);

H is the magnetic field strength (as calculated from the magnetizing current and the magnetic field strength to current ratio (known as the coil constant) for the solenoid) (in A/m).



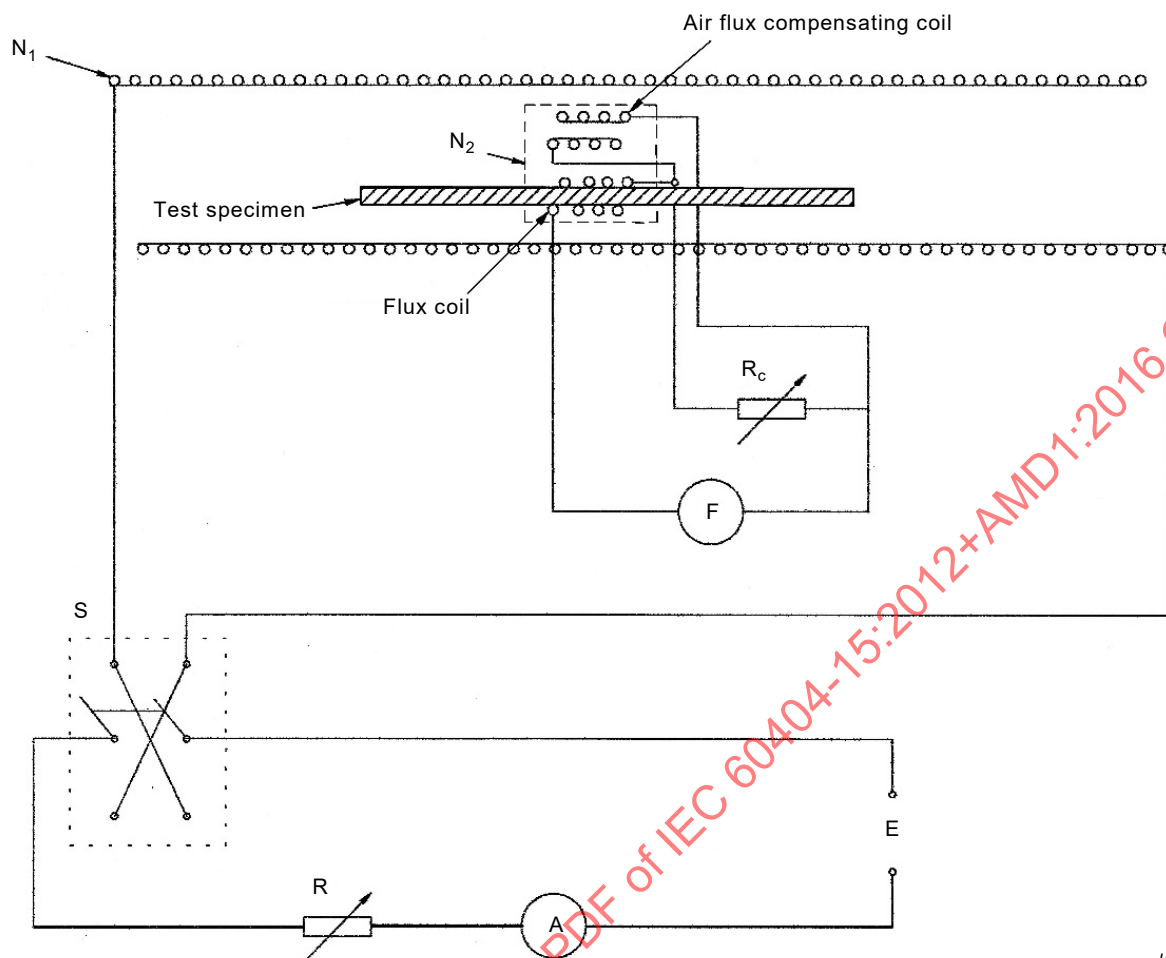
IEC 1691/12

Key

- A current measuring device or ammeter
- E d.c. supply
- F flux integrator
- N₁ solenoid
- N₂ search coil or magnetic moment detection coil
- R variable resistor (controlling magnetizing current)
- S switch

Figure 1 – Circuit diagram for the solenoid method with withdrawal of test specimen

NOTE In Figure 1, the search coil N₂ is replaced by a moment detection coil for the magnetic moment method.



IEC

Key

- A Current measuring device or ammeter
- E d.c. power supply
- F Flux integrator
- N_1 Solenoid
- N_2 Compensated search coil
- R Variable resistor (controlling magnetizing current)
- R_c Variable resistor (to adjust the output of the air flux compensating coil)
- S Switch for reversing the current in the solenoid

**Figure 5 – Circuit diagram for the solenoid method
with reversing of magnetizing current**

4.3 Apparatus

4.3.1 Solenoid. The solenoid shall have a length to diameter ratio of not less than 10:1 or, in the case of lower length, it shall contain coaxial supplementary coils at the ends or it shall consist of a split pair coil system (Garrett [2]). The last two coil systems shall yield at least the same degree of field homogeneity in the centre as is obtained with the long solenoid. The coils shall be wound on non-magnetic, non-conducting formers. The winding shall have a sufficient number of turns of wire to be capable of carrying a current that will produce a magnetic field strength of 100 kA/m. The magnetic field to current ratio of the solenoid (known as the coil constant) shall be determined with an uncertainty of $\pm 0,5 \%$ or better, either by an independent calibration or alternatively by measuring the magnetic field strength by means of

a calibrated Hall effect probe and by measuring the corresponding magnetizing current (using the method described in 4.3.5).

NOTE 1 More than one solenoid (or split pair coil system) may be required to cover the complete range of magnetic field strength.

NOTE 2 The optimal diameter of the solenoid depends upon the diameter of test specimens to be measured and the sensitivity of the measurement. For measurements on bars up to 30 mm in diameter having a relative magnetic permeability of 1,005, the internal diameter of the solenoid would be approximately 80 mm to accommodate the requisite search coil.

4.3.2 Search coil for the solenoid method with withdrawal of test specimen. For the solenoid method with withdrawal of test specimen, the search coil shall be wound on a non-magnetic, non-conducting former. Typically, for test specimens up to 30 mm in diameter, the internal diameter of the aperture in the search coil is 32 mm to allow test specimens to be freely inserted and withdrawn. The length of the winding shall be 40 mm; end cheeks of between 75 mm and 80 mm diameter shall be fitted to the former. The winding can be, for example, 10 000 turns of 0,2 mm diameter insulated wire with interleaving as necessary.

NOTE The winding can be tapped at intervals to facilitate the adjustment of the sensitivity of the measuring system when determining the relative magnetic permeability of test specimens in the higher part of the permeability range.

4.3.7 Search coil for the solenoid method with reversing of magnetizing current. For the solenoid method with reversing of magnetizing current, the flux coil and the air flux compensating coil shall each be wound on a non-magnetic, non-conducting former. The cross section area of the flux coil shall be no more than ten times that of the test specimen and there must be a sufficient number of turns for adequate resolution (typically >1 000 turns). The flux coil should be no longer than 20 % of the test specimen length.

The flux coil and the air flux compensating coil are connected in series opposition to form a compensated search coil. The length and effective area-turns of the flux coil and the air flux compensating coil shall be nearly equal, with the area-turns of the air flux compensating coil slightly larger than those of the flux coil so the compensating signal can be attenuated with a variable resistor (R_c in Figure 5) to match the signal from the empty flux coil.

The air flux compensating coil shall be located a sufficient distance from the flux coil such that there is no significant coupling to the magnetic flux of the test specimen. Coupling will change the effectiveness of the compensation when a sample is present, and can cause significant measurement error.

The signal from the air flux compensating coil shall be adjusted to exactly cancel the signal from the empty flux coil. With no sample present, apply the highest magnetizing current to be used in the test, reset the flux integrator, reverse the magnetizing current, and adjust the variable resistor R_c to obtain the minimum output from the compensated coil set N_2 . Repeat as necessary until the output is as low as can be adjusted.

4.3.3 Moment detection coil. For much shorter solid right cylinders with a length to diameter ratio of 1:1, a moment detection coil with a homogeneous sensitivity over the volume of the test specimen shall be used for measuring the magnetic dipole moment of the cylinder (see Figure 2). The magnetic polarization is calculated from

$$J = \frac{j}{V} \quad (2)$$

where

J is the magnetic polarization (in T);

j is the magnetic dipole moment (in Wbm);

V is the volume of the test specimen (in m³).

The moment detection coil can be a solenoid with additional homogenizing windings close to the ends of the coil.

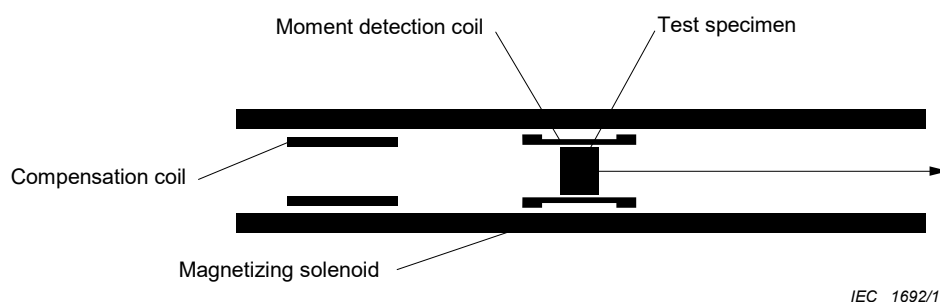


Figure 2 – Coil system for the determination of the magnetic dipole moment

The measurement of the magnetic moment of short cylinders with a length to diameter ratio of 1:1 shall be restricted to materials having a relative permeability smaller than $\mu_r = 1,2$. If this condition is not met, the magnetic field strength inside the test specimen and the polarization become inhomogeneous and this will produce significant errors in the measured relative magnetic permeability.

In the region $\mu_r = 1,003$ to 1,2, a linear correction for the effect of the self-demagnetizing field is appropriate. See Annex A for more information.

NOTE Typically, weight pieces of the classes E₁, E₂ and E₃ according to OIML R111-1 (2004) [3] fall into this range.

For this correction, equation (A.2) of Annex A is to be used together with the value of the magnetometric self-demagnetization factor N_m as obtained from reference [6].

For example, for a cylindrical sample with a 1:1 aspect ratio, values of the relative correction to the applied magnetic field for different relative magnetic permeabilities due to self-demagnetization are given in Table 2.

Table 2 – Cylindrical sample with a 1:1 aspect ratio

μ_r	N_m	$\Delta H/H$
1,000 1	0,311 6	0,003 %
1,007	0,311 4	0,22 %
1,2	0,309 3	6,2 %

$\Delta H/H$ is the relative correction of the magnetic field strength and N_m is the magnetometric self-demagnetization factor.

This is discussed in more detail in Annex A.

4.3.4 Flux integrator. The flux integrator shall be an electronic charge integrator or similar device, calibrated with an uncertainty of $\pm 0,5$ % or better.

4.3.5 Current measuring device. The current measuring device shall consist of a calibrated resistor connected in series with the magnetizing circuit and a calibrated digital voltmeter.

The magnetizing current shall be determined from the measurement of the voltage developed across the resistor. The combined uncertainties of the resistor and voltmeter shall be such that the magnetizing current can be determined with an uncertainty of $\pm 0,2$ % or better. Alternatively, an ammeter calibrated with an equivalent uncertainty can be used.

4.3.6 Micrometer. The micrometer for measuring the transverse dimensions of the test specimen for the solenoid method shall be calibrated. For the magnetic moment method, the volume is required and appropriate dimensional measurements shall be made.

4.4 Test specimen for the solenoid method

The test specimen shall consist of a round or rectangular bar, or a number of strips or wires having a total cross-sectional area of at least 100 mm². The maximum cross-sectional area shall be determined by the diameter of the central aperture of the search coil. Allowance shall be made for the easy insertion and withdrawal of the test specimen without disturbing the position of the search coil.

To avoid significant errors introduced by self-demagnetization, the length to equivalent diameter ratio of the test specimen shall be not less than 10:1. When corrections for self-demagnetization are required see Annex A.

For example, values are given in Table 3 for a rod of circular cross section with an aspect ratio of 10:1, a diameter of 30 mm and a search coil with an effective average diameter of 52,2 mm. The relative corrections to the applied magnetic field strength and the magnetic polarization for different relative magnetic permeabilities due to self-demagnetization are shown.

Table 3 – Circular cross section rod with an aspect ratio of 10:1

μ_r	N_f	$\Delta H/H$	$\Delta J/J$
1,000 1	0,004 927	0,000 %	1,49 %
1,007	0,004 931	0,003 %	1,49 %
1,2	0,005 054	0,101 %	1,53 %
2	0,005 541	0,554 %	1,68 %

$\Delta H/H$ is the relative correction of the magnetic field strength, N_f is the fluxmetric self-demagnetization factor and $\Delta J/J$ is the relative correction of the magnetic polarization.

This is discussed in more detail in Annex A.

4.5 Procedure

4.5.1 Cross-sectional area of test specimen. The cross-section area of the test specimen shall be established from a number of measurements of each dimension. For a test specimen for the solenoid method, the diameter or transverse dimensions shall be measured by means of a calibrated micrometer (see 4.3.6) at approximately 10 mm intervals along the central 40 mm of length. The mean cross-sectional area, expressed in square metres, shall be calculated from the mean dimensions, with an uncertainty of $\pm 0,5$ %. The difference between the greatest and least cross-sectional areas shall not exceed $\pm 0,5$ % of the mean area.

For a test specimen for the magnetic moment method, the determination of the volume is required and sufficient dimensional measurements shall be made so that this can be determined with an uncertainty of $\pm 0,71$ % (this is the square root of the sum of the squares of 0,5 % for the cross section and 0,5 % for the length).

4.5.2 Calibration of flux integrator. The calibration of the flux integrator shall be established with an uncertainty of $\pm 0,5$ % or better. In order to do this, the secondary winding of a calibrated mutual inductor is connected in series with the search coil and flux integrator and the current flowing in the primary winding of the mutual inductor is changed to give the change in magnetic flux required. From the integrator reading, equation (3) is used to determine the calibration constant of the integrator.

$$k\Phi_{IR} = M\Delta I \quad (3)$$

where

k is the calibration constant of the flux integrator;

Φ_{IR} is the flux integrator reading (in Wb);

M is the mutual inductance for the calibration (in H);

ΔI is the change in primary current in the mutual inductor (in A).

NOTE It is important that the total winding resistance at the input of the integrator is the same for calibration and measurements on the test specimen. To avoid the possibility of coupling of the search coil or moment coil to the mutual inductor, a non-inductive resistance equivalent to the secondary of the mutual inductor can be placed in series with the search coil or the moment coil.

4.5.3 Demagnetization of test specimen. The test specimen shall be demagnetized immediately prior to the measurement from a magnetic field strength of not less than 20 kA/m by the slow reversal of a gradually reducing direct current or a gradually reducing alternating current (for the frequency, see next paragraph), provided the magnetic field produced by the latter can completely penetrate the test specimen. Test specimens which have been subjected to a higher magnetic field strength shall be demagnetized from a suitably high magnetic field before measurement. The effectiveness of the demagnetization shall be checked by inserting the test specimen into the search coil or moment detection coil and, with no current flowing, withdrawing the test specimen and observing the reading on the flux integrator. There shall be either a zero reading or an insignificantly small reading on the flux integrator.

In order that the magnetic field may completely penetrate the test specimen, the frequency of reversal shall not exceed 0,5 Hz for a cross-section of 10 mm $\times$ 10 mm and 0,1 Hz for a cross-section of 20 mm $\times$ 20 mm. Some materials may also display magnetic viscosity effects so that even slower reversals are required to ensure complete demagnetization. In cases of doubt, the effect of slower and more rapid reversals shall be compared.

The magnetizing current to produce the required magnetic field strength shall be calculated from the magnetic field strength to current ratio previously determined for the solenoid (see 4.3.1).

At low values of magnetic field strength, the earth's magnetic field may be significant. It is recommended that the axis of the solenoid is aligned in a horizontal plane in a direction normal to the horizontal component of the earth's magnetic field.

4.5.4 Measurement of magnetic polarization with withdrawal of the test specimen. The magnetic polarization shall be measured by inserting the demagnetized test specimen into the search coil or moment detection coil, adjust the magnetizing current to the required value taking care not to overshoot, zero the flux integrator, withdraw the test specimen and record the integrator reading. Care shall be taken to withdraw the test specimen from the search coil or moment detection coil to a position where it no longer has an influence on the search coil or moment detection coil, as indicated by the integrator reading.

The weight of the specimen can change the direction of the search coil axis used in the solenoid method by a small amount during the withdrawal of the specimen, which leads to an additional induced voltage in the search coil. Therefore the search coil should be fixed very rigidly or mechanically decoupled from the movement of the specimen.

Electrostatic charging of the search coil or moment coil during the withdrawal of the specimen can disturb the flux measurements and should be prevented. A copper shielding might be effective to avoid signal contributions from electrostatic charges.

Small fluctuations of the magnetizing current or of the ambient magnetic field can induce large instabilities in the measured flux. To avoid this, a compensation coil can be used.

4.5.5 Measurement of magnetic polarization with reversing of magnetizing current. The magnetic polarization shall be measured by inserting the demagnetized test specimen into the center of the compensated search coil, adjust the magnetizing current to the required positive value taking care not to overshoot, zero the flux integrator, reverse the magnetizing current to the same amplitude as the positive value taking care not to overshoot, and record the integrator reading. The reading represents two times the magnetic polarization due to the current reversal.

NOTE The use of an air flux compensating coil and compensating resistor allows the air flux enclosed by the flux coil to be cancelled out so that magnetic polarization can be measured directly (see 4.3.7).

4.5.6 Averaging over the two sample directions. For the solenoid method, the complete measurement procedure shall be performed two times, once with one end of the test specimen inserted into the search coil and again with the other end inserted into the search coil. Either the two integrator readings shall be averaged or used separately, depending on the customer's requirement.

4.5.7 Repeatability. The procedure is repeated as necessary to determine the measurement repeatability.

4.6 Calculation

For the solenoid method with withdrawal of test specimen, the magnetic polarization shall be calculated using Equation (4):

$$J = \frac{\Phi_{IR}}{NA_S} \quad (4)$$

For the solenoid method with reversing of magnetizing current, the magnetic polarization shall be calculated using Equation (7):

$$J = \frac{\Phi_{IR}}{2NA_s} \quad (7)$$

where

J is the magnetic polarization (in T);

Φ_{IR} is the flux integrator reading corrected in accordance with the integrator calibration (in Wb);

A_s is the cross sectional area of the test specimen (in m²);

N is the number of turns of the search coil.

For the magnetic moment method, the magnetic dipole moment shall be calculated using equation (5):

$$j = \Phi_{IR} \cdot \left(\frac{H}{I} \right)^{-1} \quad (5)$$

where

j is the magnetic dipole moment (in Wbm);

Φ_{IR} is the flux integrator reading corrected in accordance with the integrator calibration (in Wb);

H/I is the coil constant (magnetic field strength to current ratio) of the moment coil system (in (A/m)/A).

The magnetic polarization, J , shall then be calculated using equation (2).

If necessary, see Annex A for the calculation of corrections for self-demagnetization. In that case, the relative magnetic permeability of the test specimen shall be calculated from the following equation:

$$\mu_r = 1 + \frac{J}{\mu_0 H} \quad (6)$$

where

μ_r is the relative magnetic permeability of the test specimen (ratio);

μ_0 is the magnetic constant ($4\pi \times 10^{-7}$) (in H/m);

J is the magnetic polarization (in T);

H is the magnetic field strength (in A/m) (as calculated from the magnetizing current and the coil constant of the solenoid).

4.7 Uncertainty

The estimation of the uncertainties in the measurements associated with the solenoid and magnetic moment methods shall be divided into three elements: the uncertainty in the measurement of the magnetic polarization (J), the uncertainty in the measurement of the magnetic field strength (H) and, from these, the determination of the uncertainty of the relative magnetic permeability minus 1 ($\mu_r - 1$). From this, the absolute uncertainty in the relative magnetic permeability (μ_r) shall be determined. If corrections have been applied for demagnetisation, a contribution for this shall be included in the uncertainty budget.

The individual contributions to these uncertainties shall be determined and then combined in accordance with the guidelines set out in the ISO/IEC Guide to the expression of uncertainty in measurement (ISO/IEC GUIDE 98-3: 2008).

5 Magnetic balance method

5.1 Principle

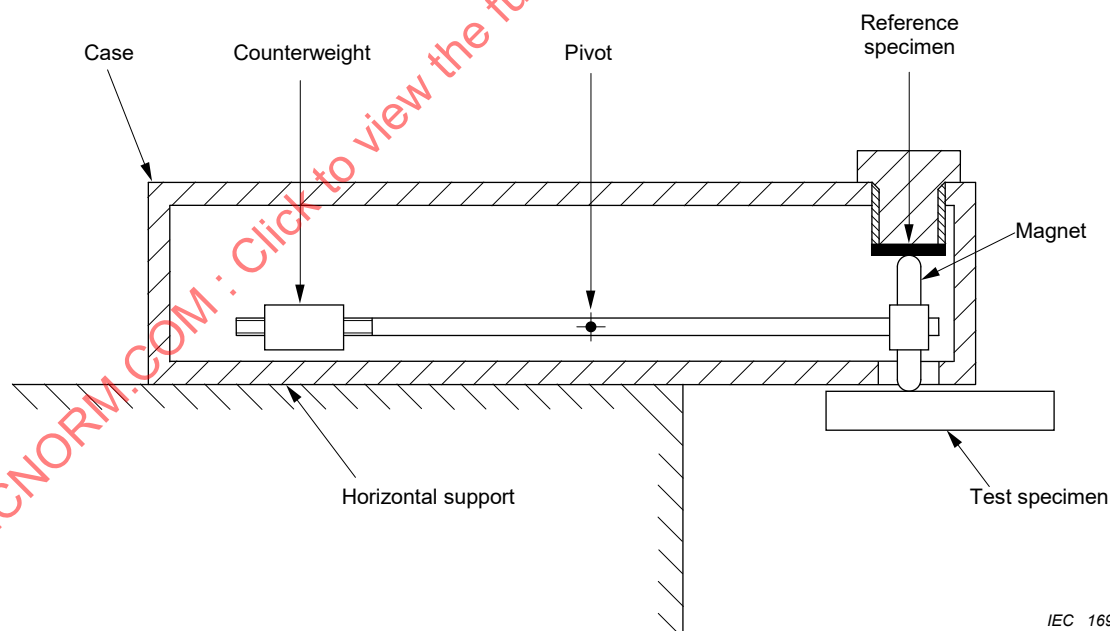
This is a comparator method that provides industry with a convenient way of determining the relative magnetic permeability of a material that is “less than” or “greater than” that of disc inserts.

The magnetic balance is designed for the determination of the relative magnetic permeability of small test specimens and components, which are unsuitable for measurement by the reference method. In addition, it is useful for in situ and on site measurements on materials and complete assemblies.

The relative magnetic permeability is determined by comparing the attraction of a magnet to a series of disc inserts and the specimen under test using commercially available instruments such as that shown in Figure 3. See 5.2 for information about disc inserts and materials.

The magnet is either attracted to a disc insert screwed into the top of the instrument above the magnet, or to the test specimen placed beneath the magnet, depending on which material has the higher effective relative magnetic permeability. Some types of insert have a ferromagnetic grub screw fitted in the cap. This screw is adjusted by the manufacturer to produce specific values of effective relative magnetic permeability at the point where the magnet contacts a metal disc of very low magnetic permeability.

NOTE 1 For the limitations regarding the dependence of relative magnetic permeability with magnetic field strength, see the Introduction to this standard.



IEC 1693/12

Figure 3 – Magnetic balance: side view

NOTE 2 Other forms of this instrument exist. One such instrument has a phosphor bronze hair spring attached to the central pivot and to an index-type knob having a scale with arbitrary divisions. In this case, the force required to detach the magnet from a reference material, as indicated by the scale reading, is compared with that for the specimen under test. Another type of instrument employs a strain gauge to measure this force. The remainder of

this section considers the use of disc inserts only. For other types of instruments, these disc inserts can be replaced by calibrated reference materials.

5.2 Disc inserts and reference materials

5.2.1 A series of disc inserts (supplied with the balance) covering the range of relative magnetic permeability from 1,005 to 5 can be used (see 5.1).

The relative magnetic permeability of the disc inserts is assessed by using a number of calibrated reference materials. Disc inserts that have a nominal relative magnetic permeability larger than 2 cannot be assessed.

For a relative magnetic permeability larger than 2, a reference material cannot be calibrated using this standard. A note of this should be given in the test report explaining that the values measured using the magnetic balance are for indication only.

Reference materials in the form of a rod made up of a number of short cylinders of similar materials should be calibrated by the solenoid method or magnetic moment method. Individual cylinders should then be used to check the approximate relative magnetic permeability of the disc insert.

NOTE The reference materials or disc inserts may be sent to national measurement laboratories that offer this calibration capability.

5.3 Test specimen

The dimensions of the test specimen shall be either:

- a) 25 mm × 25 mm (or 25 mm diameter) and 25 mm thick; or
- b) less than this subject to agreement between the respective parties.

One face shall be finished smooth, flat and clean from machine tool contamination. Since the relative magnetic permeability of most materials and alloys is sensitive to heat treatment and mechanical working, material immediately adjacent to cut edges shall not be used. Care shall be taken to avoid the effects of heating and work hardening during machining.

Where necessary, finishing shall be carried out by light grinding with sufficient coolant.

NOTE For test specimens of dimensions less than 25 mm, an error in the measured permeability value could be introduced [4]. The magnitude of this error will be dependent upon the dimensions and permeability of the material. The best results are achieved when the test and reference materials are of similar dimensions.

5.4 Procedure

5.4.1 The test specimen and the reference material shall be demagnetized in accordance with 4.5.3.

Where the size or location of the test specimen does not allow demagnetization to be carried out, this shall be stated on the test report.

5.4.2 The magnetic balance shall be placed on a horizontal surface with the disc insert of highest value of relative magnetic permeability in place. The test specimen shall be offered up to the underside of the magnet. If the magnet is attracted to the test specimen then the relative magnetic permeability of the material is greater than can be determined by the instrument. If the magnet is attracted to the disc insert then sequentially replace the disc insert with those of progressively lower relative magnetic permeability until the magnet is attracted to the test specimen.

The procedure shall be repeated several times over the surface of the test specimen to check the consistency and uniformity of the value. Measurements shall not be taken close to edges or in small re-entrant areas.

5.5 Evaluation of the relative magnetic permeability

The relative magnetic permeability of the test specimen shall be taken as being in the range between the last two disc inserts, that is between the one in place when the magnet is attracted to the test specimen and the one of lowest permeability to which the magnet is attracted.

NOTE The disc inserts can be compared to reference materials calibrated at national measurement institutes that offer this capability.

5.6 Uncertainty

The uncertainty in the calibration of the disc inserts or reference materials used shall be stated (see 4.7 for the uncertainty of the solenoid method).

NOTE Due to the fact that the instrument can only determine the range in which the relative magnetic permeability lies, it is not possible to assign an uncertainty value to the measurement.

6 Permeability meter method

6.1 Principle

This is a comparator method that provides industry with a convenient method of determining the relative magnetic permeability of a material.

The permeability meter method, schematically shown in Figure 4, is suitable for determining the relative permeability of feebly magnetic materials between $\mu_r = 1,0$ and $2,0$.

The change in magnetic flux density produced in the air at one pole of a permanent magnet is measured, using commercially available permeability meters, when a low magnetic permeability test specimen is placed in contact with that pole. The changes in magnetic flux density are small and are measured with a fluxgate magnetometer(s) in a gradiometer arrangement built into a probe which also houses the permanent magnet, see Figure 4.

When the instrument is calibrated against standards with known permeability values as determined by the manufacturer of the instrument against their calibrated standards or national standards, the measured values of the relative permeability can be made traceable to national standards. These standards can also be sent to national measurement laboratories for calibration.

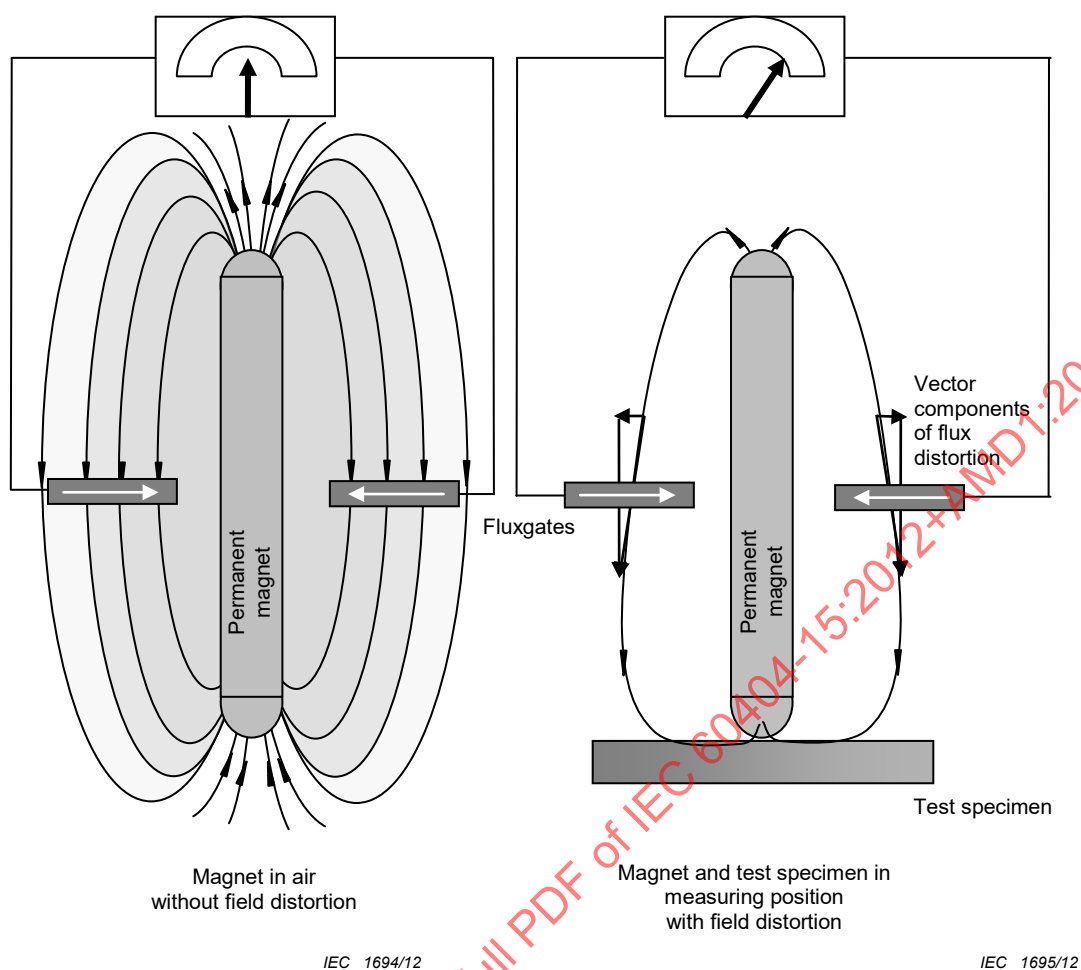


Figure 4 – Schematic of the permeability meter arrangement and magnetic field distribution without and with test specimen

6.2 Reference specimens and materials

The instrument shall be calibrated at a minimum of one point on each range to be used using the appropriate number of reference materials. The reference materials shall be calibrated using the solenoid method or the magnetic moment method (see Clause 4). Size and shape of the reference sample are critical and, for absolute measurements, they shall be in accordance with the specifications of the instrument manufacturer.

NOTE Reference samples are available from the instrument manufacturers and some calibration laboratories and national measurement laboratories. They may be submitted for calibration to those standard laboratories that offer the capability for this kind of calibration.

6.3 Test specimen

The test specimen shall be in accordance with 5.3.

6.4 Procedure

The test specimen and the reference specimen shall be demagnetized in accordance with 4.5.3.

Where the size or location of the test specimen does not allow demagnetization to be carried out, this shall be stated on the test report.

The probe shall be mounted such that it will not be moved during the measurement since small changes in the ambient magnetic field strength affect the zero setting of the instrument. Without the test specimen in place, the instrument shall be zeroed in accordance with the manufacturer's instructions. The test specimen shall be brought into contact with the magnet pole tip in the probe and the range of the permeability meter shall be adjusted to give a reading on the scale and, where possible, the range shall be selected which gives the largest deflection for good resolution. The test specimen shall be removed, checked and if necessary the zero of the instrument adjusted. The measurement of the test specimen shall be repeated at several places on flat areas and record the results. The instrument shall then be calibrated on the range used with a suitable reference specimen, see 6.2. The indicated permeability values for the test specimen shall then be adjusted accordingly.

6.5 Uncertainty

The estimation of the uncertainty in the measurement of the relative magnetic permeability by the permeability meter method shall be divided into two elements: the uncertainty in the value of the reference material and the resolution and repeatability of the permeability meter.

NOTE An additional uncertainty may be incurred if the test and reference specimens are not of similar dimensions.

The individual contributions to these uncertainties shall then be identified and then combined in accordance with the guidelines set out in the ISO/IEC Guide to the expression of uncertainty in measurement (ISO/IEC GUIDE 98-3: 2008).

7 Test report

The test report shall include the following:

- a statement that the measurement procedure was conducted in accordance with this standard;
- the method used;
- a note on whether demagnetization has been performed;
- the number and size of the specimens tested;
- the value of the relative magnetic permeability;
- for the solenoid method, the value of applied magnetic field strength;
- the temperature during the measurement;
- a statement on the uncertainty of the determined value of relative magnetic permeability.

Annex A (informative)

Correction for self-demagnetization

A.1 General

For both the solenoid and magnetic moment methods, corrections will be needed for self-demagnetization.

In 4.3.3, example figures were given for the relative corrections for the magnetic moment method.

In 4.4, example figures were given for the relative corrections for the solenoid method.

The calculations to determine these figures are given in this annex.

A.2 Solenoid method

When the ratio of the length to equivalent diameter of the test specimen is less than 10:1, a correction for self-demagnetization may be necessary.

A correction, ΔJ (in T), to the measured polarization is determined from equation (A.1):

$$\Delta J = \frac{A_W}{A_S} N_f J \quad (\text{A.1})$$

where

- N_f is the fluxmetric/ballistic demagnetization factor [5,6];
- A_W is the effective cross sectional area of the search coil (in m²);
- A_S is the cross sectional area of the test specimen (in m²);
- J is the measured polarization (in T).

A correction, ΔH (in A/m), to the applied magnetic field strength is determined using equation (A.2):

$$\Delta H = -\frac{N_f J}{\mu_0} \quad (\text{A.2})$$

where

- μ_0 is the magnetic constant ($4\pi \times 10^{-7}$) (in H/m).

The corrected magnetic polarization J and the applied magnetic field strength H are used in equation (6) to determine the relative magnetic permeability.

When a correction for self-demagnetization is made, an uncertainty contribution needs to be included and this shall be determined for each measurement.

Equation (A.1) only applies when the return flux through the search coil is homogeneous. This should be appropriate for test specimens that meet the conditions given in 4.4 and for solenoids having a small distance between sample and winding (see 4.3.2). However, for shorter samples or for coils with a larger gap between sample and winding, the inhomogeneous profile of the self-demagnetizing field should be taken into account. Such a correction can be carried out by numerical calculation of the self-demagnetizing field.

A.3 Magnetic moment method

A correction, ΔH (in A/m), to the applied magnetic field strength is determined using equation (A.3):

$$\Delta H = -\frac{N_m J}{\mu_0} \quad (\text{A.3})$$

where

N_m is the magnetometric demagnetization factor [6].

The corrected magnetic polarization J and applied magnetic field strength H are used in equation (6) to determine the relative magnetic permeability.

When a correction for self-demagnetization is made an uncertainty contribution needs to be included and this shall be determined for each measurement.

NOTE For relative magnetic permeabilities above 1,2, the magnetic field inside the test specimen and the polarization of the test specimen become inhomogeneous resulting in significant errors.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-15:2012+AMD1:2016 CSV

Bibliography

- [1] HALL, M.J., DRAKE, A.E., HARMON S.A.C. and AGER, C.I., Low permeability reference standards with improved high magnetic field strength performance. IEE Proceedings – Scientific Measurement Technology, 1988, 145(4), 181-183
- [2] GARRETT, M.W.: Axially symmetric system for generating and measuring magnetic field. Part 1. J.Appl.Phys. 22(1951), 1091-1107
- [3] OIML R111-1 (2004): weight of classes E1, E2, F1, F2, M1, M1-2, M2, M2-3 and M3
- [4] HALL, M.J., DRAKE, A.E., HENDERSON, L.C.A., Guidance notes for use with NPL low permeability reference standards, NPL Report CEM 12, March 1999
- [5] JOSEPH, R.I., Ballistic demagnetizing factor in uniformly magnetized cylinders. J App Phys, 1966, Vol. 37 No. 13, pp 4639-4643
- [6] CHEN, D.-X., BRUG, J.A., GOLDFARB, R.B., "Demagnetizing Factors for Cylinders", IEEE Trans. Mag. 27 (1991) pp 3601-3619
- [7] EN 12163, *Copper and copper alloys – Rod for general purposes*
- [8] EN 10088-1, *Stainless steels – Part 1: List of stainless steels*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-15:2012+AMD1:2016 CSV

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	25
INTRODUCTION	27
1 Domaine d'application	28
2 Références normatives	29
3 Termes et définitions	29
4 Méthode utilisant un solénoïde et méthode utilisant le moment magnétique	29
4.1 Généralités	29
4.2 Principe	29
4.3 Appareillage	31
4.4 Éprouvette pour la méthode utilisant un solénoïde	34
4.5 Procédure	35
4.6 Calcul	36
4.7 Incertitudes	37
5 Méthode de la balance magnétique	38
5.1 Principe	38
5.2 Disques et matériaux de référence	39
5.3 Éprouvette	39
5.4 Procédure	39
5.5 Évaluation de la perméabilité magnétique relative	40
5.6 Incertitudes	40
6 Méthode de l'appareil de mesure de la perméabilité	40
6.1 Principe	40
6.2 Éprouvettes et matériaux de référence	41
6.3 Éprouvette	41
6.4 Procédure	41
6.5 Incertitudes	42
7 Rapport d'essai	42
Annexe A (informative) Correction pour l'autodésaimantation	43
Bibliographie	45
Figure 1 – Schéma de circuit de la méthode utilisant un solénoïde avec retrait de l'éprouvette	30
Figure 2 – Système de bobines pour la détermination du moment du dipôle magnétique	33
Figure 3 – Balance magnétique vue de côté	38
Figure 4 – Schéma de la disposition de l'appareil de mesure de la perméabilité et de la distribution du champ magnétique avec et sans éprouvette	41
Figure 5 – Schéma de circuit de la méthode utilisant un solénoïde avec inversion du courant d'aimantation	31
Tableau 1 – Gammes de perméabilité magnétique relative pour les méthodes décrites	28
Tableau 2 – Échantillon cylindrique de rapport 1:1	33
Tableau 3 – Tige de section circulaire de rapport 10:1	34

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

Partie 15: Méthodes de détermination de la perméabilité magnétique relative des matériaux faiblement magnétiques

AVANT-PROPOS

- 1) La Commission Electrotechnique Internationale (IEC) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de l'IEC). L'IEC a pour objet de favoriser la coopération internationale pour toutes les questions de normalisation dans les domaines de l'électricité et de l'électronique. A cet effet, l'IEC – entre autres activités – publie des Normes internationales, des Spécifications techniques, des Rapports techniques, des Spécifications accessibles au public (PAS) et des Guides (ci-après dénommés "Publication(s) de l'IEC"). Leur élaboration est confiée à des comités d'études, aux travaux desquels tout Comité national intéressé par le sujet traité peut participer. Les organisations internationales, gouvernementales et non gouvernementales, en liaison avec l'IEC, participent également aux travaux. L'IEC collabore étroitement avec l'Organisation Internationale de Normalisation (ISO), selon des conditions fixées par accord entre les deux organisations.
- 2) Les décisions ou accords officiels de l'IEC concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux de l'IEC intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les Publications de l'IEC se présentent sous la forme de recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux de l'IEC. Tous les efforts raisonnables sont entrepris afin que l'IEC s'assure de l'exactitude du contenu technique de ses publications; l'IEC ne peut pas être tenue responsable de l'éventuelle mauvaise utilisation ou interprétation qui en est faite par un quelconque utilisateur final.
- 4) Dans le but d'encourager l'uniformité internationale, les Comités nationaux de l'IEC s'engagent, dans toute la mesure possible, à appliquer de façon transparente les Publications de l'IEC dans leurs publications nationales et régionales. Toutes divergences entre toutes Publications de l'IEC et toutes publications nationales ou régionales correspondantes doivent être indiquées en termes clairs dans ces dernières.
- 5) L'IEC elle-même ne fournit aucune attestation de conformité. Des organismes de certification indépendants fournissent des services d'évaluation de conformité et, dans certains secteurs, accèdent aux marques de conformité de l'IEC. L'IEC n'est responsable d'aucun des services effectués par les organismes de certification indépendants.
- 6) Tous les utilisateurs doivent s'assurer qu'ils sont en possession de la dernière édition de cette publication.
- 7) Aucune responsabilité ne doit être imputée à l'IEC, à ses administrateurs, employés, auxiliaires ou mandataires, y compris ses experts particuliers et les membres de ses comités d'études et des Comités nationaux de l'IEC, pour tout préjudice causé en cas de dommages corporels et matériels, ou de tout autre dommage de quelque nature que ce soit, directe ou indirecte, ou pour supporter les coûts (y compris les frais de justice) et les dépenses découlant de la publication ou de l'utilisation de cette Publication de l'IEC ou de toute autre Publication de l'IEC, ou au crédit qui lui est accordé.
- 8) L'attention est attirée sur les références normatives citées dans cette publication. L'utilisation de publications référencées est obligatoire pour une application correcte de la présente publication.
- 9) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Publication de l'IEC peuvent faire l'objet de droits de brevet. L'IEC ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de brevets et de ne pas avoir signalé leur existence.

DÉGAGEMENT DE RESPONSABILITÉ

Cette version consolidée n'est pas une Norme IEC officielle, elle a été préparée par commodité pour l'utilisateur. Seules les versions courantes de cette norme et de son(s) amendement(s) doivent être considérées comme les documents officiels.

Cette version consolidée de l'IEC 60404-15 porte le numéro d'édition 1.1. Elle comprend la première édition (2012-09) [documents 68/442/FDIS et 68/443/RVD] et son amendement 1 (2016-12) [documents 68/531/CDV et 68/544/RVC]. Le contenu technique est identique à celui de l'édition de base et à son amendement.

Cette version Finale ne montre pas les modifications apportées au contenu technique par l'amendement 1. Une version Redline montrant toutes les modifications est disponible dans cette publication.

La Norme internationale IEC 60404-15 a été établie par le comité d'études 68 de l'IEC: Matériaux magnétiques tels qu'alliages et aciers.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 60404, présentée sous le titre général *Matériaux magnétiques*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de la publication de base et de son amendement ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives à la publication recherchée. A cette date, la publication sera

- reconduite,
- supprimée,
- remplacée par une édition révisée, ou
- amendée.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 60404-15:2012+AMD1:2016 CSV

INTRODUCTION

Il est souvent nécessaire de déterminer la perméabilité magnétique relative des matériaux faiblement magnétiques pour évaluer leur effet sur le champ magnétique ambiant. Les matériaux faiblement magnétiques typiques sont les aciers inoxydables austénitiques et le laiton "non magnétique".

La perméabilité magnétique relative de certains de ces matériaux peut varier de manière significative avec l'intensité du champ magnétique appliqué. Dans la majorité des cas, ces matériaux sont utilisés dans des applications relatives au champ magnétique terrestre ambiant. En Europe, ce champ est compris entre 35 A/m et 40 A/m, en Extrême-Orient, il est compris entre 25 A/m et 35 A/m et en Amérique du Nord, entre 25 A/m et 35 A/m. Toutefois, à l'heure actuelle, aucune méthode de mesure ne permet de déterminer la perméabilité magnétique relative des matériaux faiblement magnétiques à une valeur si faible de l'intensité du champ magnétique.

Les propriétés des matériaux faiblement magnétiques ont été étudiées, principalement pour produire des matériaux de référence améliorés. Ces études ont montré [1]¹ qu'il est possible de produire des matériaux de référence qui présentent une perméabilité magnétique relative très constante sur la gamme allant du champ magnétique terrestre à une intensité de champ magnétique supérieure ou égale à 100 kA/m.

Puisque des matériaux métalliques traditionnels peuvent également être utilisés comme des matériaux de référence, leur perméabilité magnétique relative peut être déterminée en utilisant la méthode de référence. Il est important que l'intensité du champ magnétique utilisée pour déterminer la perméabilité magnétique relative soit établie pour tous les matériaux, mais en particulier pour les matériaux traditionnels puisque les variations avec le champ magnétique appliqué peuvent être importantes. Ce comportement nécessite également d'être considéré si les matériaux de référence utilisés sont faits à partir de matériaux traditionnels pour étalonner les méthodes de comparaison. Cela est dû au fait que ces méthodes utilisent des champs magnétiques qui varient dans le volume du matériau soumis à l'essai et il est difficile de déterminer la perméabilité magnétique relative à utiliser pour l'étalonnage.

Lorsque l'effet d'un matériau faiblement magnétique sur le champ magnétique terrestre ambiant est critique, il convient de considérer la mesure directe de cet effet en utilisant un magnétomètre sensible.

¹ Les chiffres entre crochets renvoient à la bibliographie.

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

Partie 15: Méthodes de détermination de la perméabilité magnétique relative des matériaux faiblement magnétiques

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 60404 spécifie une méthode utilisant un solénoïde, une méthode utilisant le moment magnétique, une méthode utilisant une balance magnétique et une méthode utilisant un appareil de mesure de la perméabilité pour déterminer la perméabilité magnétique relative des matériaux faiblement magnétiques (y compris l'acier inoxydable austénitique). La méthode utilisant une balance magnétique et la méthode utilisant un appareil de mesure de la perméabilité sont toutes les deux des méthodes de comparaison étalonnées utilisant des matériaux de référence en vue de déterminer la valeur de la perméabilité magnétique relative de l'éprouvette. La gamme de perméabilité magnétique relative pour chacune de ces méthodes est présentée dans le Tableau 1. Les méthodes données portent sur des intensités de champ magnétique appliquées comprises entre 5 kA/m et 100 kA/m.

Tableau 1 – Gammes de perméabilité magnétique relative pour les méthodes décrites

Méthode de mesure	Gamme de perméabilité magnétique relative
Solénoïde	1,003 à 2
Moment magnétique	1,003 à 1,2
Balance magnétique	1,003 à 5
Appareil de mesure de la perméabilité	1,003 à 2

NOTE 1 La gamme de perméabilité magnétique relative donnée pour la méthode utilisant une balance magnétique couvre les disques fournis avec un instrument typique. Ces disques peuvent seulement être évalués à des valeurs pour lesquelles des matériaux de référence étalonnés existent.

NOTE 2 Pour une perméabilité magnétique relative supérieure à 2, un matériau de référence ne peut pas être étalonné à l'aide de la présente Norme écrite. Cela fait l'objet d'une note dans le rapport d'essai pour expliquer que les valeurs mesurées en utilisant la méthode utilisant une balance magnétique sont uniquement données à titre indicatif.

La méthode utilisant un solénoïde est la méthode de référence. La méthode utilisant le moment magnétique décrite est principalement utilisée pour mesurer la perméabilité magnétique relative des étalons de masse.

Deux méthodes de comparaison utilisées par l'industrie sont décrites. Celles-ci peuvent être étalonnées en utilisant des matériaux de référence pour lesquels la perméabilité magnétique relative a été déterminée en utilisant la méthode de référence. Si elle est appropriée, la méthode utilisant le moment magnétique peut également être utilisée. Les dimensions du matériau de référence nécessitent de faire l'objet d'une attention particulière dans le cadre de la détermination de l'incertitude de la valeur d'étalonnage en raison des effets d'auto-désaimantation. Se reporter à l'Annexe A pour plus d'informations sur la correction de l'auto-désaimantation.