

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE
NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
IEC STANDARD

Publication 404-4

Première édition — First edition
1982

Matériaux magnétiques

**Quatrième partie: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques en courant continu
des pièces massives en acier**

Magnetic materials

**Part 4. Methods of measurement of the d.c. magnetic properties
of solid steels**



© CEI 1982

Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale
3, rue de Varembe
Genève, Suisse

Révision de la présente publication

Le contenu technique des publications de la CEI est constamment revu par la Commission afin d'assurer qu'il reflète bien l'état actuel de la technique.

Les renseignements relatifs à ce travail de révision, à l'établissement des éditions révisées et aux mises à jour peuvent être obtenus auprès des Comités nationaux de la CEI et en consultant les documents ci-dessous:

- **Bulletin de la CEI**
- **Annuaire de la CEI**
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement

Terminologie

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la Publication 50 de la CEI: Vocabulaire Electrotechnique International (V.E.I.), qui est établie sous forme de chapitres séparés traitant chacun d'un sujet défini, l'Index général étant publié séparément. Des détails complets sur le V.E.I. peuvent être obtenus sur demande.

Les termes et définitions figurant dans la présente publication ont été soit repris du V.E.I., soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Symboles graphiques et littéraux

Pour les symboles graphiques, symboles littéraux et signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera:

- la Publication 27 de la CEI: Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique;
- la Publication 117 de la CEI: Symboles graphiques recommandés.

Les symboles et signes contenus dans la présente publication ont été soit repris des Publications 27 ou 117 de la CEI, soit spécifiquement approuvés aux fins de cette publication.

Publications de la CEI établies par le même Comité d'Etudes

L'attention du lecteur est attirée sur la page 3 de la couverture, qui énumère les publications de la CEI préparées par le Comité d'Etudes qui a établi la présente publication.

Revision of this publication

The technical content of IEC publications is kept under constant review by the IEC, thus ensuring that the content reflects current technology.

Information on the work of revision, the issue of revised editions and amendment sheets may be obtained from IEC National Committees and from the following IEC sources:

- **IEC Bulletin**
- **IEC Yearbook**
- **Catalogue of IEC Publications**
Published yearly

Terminology

For general terminology, readers are referred to IEC Publication 50: International Electrotechnical Vocabulary (I.E.V.), which is issued in the form of separate chapters each dealing with a specific field, the General Index being published as a separate booklet. Full details of the I.E.V. will be supplied on request.

The terms and definitions contained in the present publication have either been taken from the I.E.V. or have been specifically approved for the purpose of this publication.

Graphical and letter symbols

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to:

- IEC Publication 27: Letter symbols to be used in electrical technology;
- IEC Publication 117: Recommended graphical symbols.

The symbols and signs contained in the present publication have either been taken from IEC Publications 27 or 117, or have been specifically approved for the purpose of this publication.

IEC publications prepared by the same Technical Committee

The attention of readers is drawn to the inside of the back cover, which lists IEC publications issued by the Technical Committee which has prepared the present publication.

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE
NORME DE LA CEI

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION
IEC STANDARD

Publication 404-4

Première édition — First edition
1982

Matériaux magnétiques

**Quatrième partie: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques en courant continu
des pièces massives en acier**

Magnetic materials

**Part 4: Methods of measurement of the d.c. magnetic properties
of solid steels**

Mots clés: matériaux magnétiques durs;
acier; essais; propriétés
magnétiques en courant
continu des matériaux; mesure.

Key words: magnetic hard materials;
steel; testing; direct-current
magnetic properties of materials;
measurement.



© CEI 1982

Droits de reproduction réservés — Copyright - all rights reserved

Aucune partie de cette publication ne peut être reproduite ni utilisée sous
quelque forme que ce soit et par aucun procédé, électronique ou méca-
nique, y compris la photocopie et les microfilms, sans l'accord écrit de l'éditeur.

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 the publisher.

Bureau Central de la Commission Electrotechnique Internationale

3, rue de Varembé
Genève, Suisse

SOMMAIRE

	Pages
PRÉAMBULE	6
PRÉFACE	6

INTRODUCTION

Articles

1. Domaine d'application et objet	8
2. Reproductibilité	8

CHAPITRE I: DÉTERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES MAGNÉTIQUES PAR LA MÉTHODE DU TORE

3. Généralités	12
3.1 Objet	12
3.2 Domaine d'application	12
3.3 Epreuve	12
3.4 Enroulements	12
4. Méthodes de mesure	14
4.1 Champ magnétique	14
4.2 Induction magnétique	14
4.3 Connexion des appareils	16
4.4 Détermination de la courbe d'aimantation normale	16
4.5 Détermination d'un cycle d'hystérésis complet	16
4.6 Détermination de l'induction rémanente	20
4.7 Détermination du champ coercitif	20

CHAPITRE II: DÉTERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES MAGNÉTIQUES PAR LA MÉTHODE DU PERMÉAMÈTRE

5. Généralités	22
5.1 Objet	22
5.2 Domaine d'application	22
6. Perméamètre type NPL	22
6.1 Principe du perméamètre	22
6.2 Epreuve	24
6.3 Bobines de mesure	24
6.4 Mesure du champ magnétique	26
6.5 Mesure de l'induction magnétique	26
6.6 Mesure de l'uniformité de l'induction magnétique dans l'épreuve	26
6.7 Connexion des appareils	28
6.8 Détermination de la courbe d'aimantation normale	28
6.9 Détermination du cycle d'hystérésis complet	30
6.10 Détermination de l'induction rémanente et du champ coercitif	30
7. Perméamètre Iliovici	32
7.1 Principe du perméamètre	32
7.2 Epreuve	32
7.3 Bobine de mesure	32
7.4 Mesure de l'intensité du champ magnétique	32
7.5 Mesure de l'induction magnétique	32
7.6 Connexion des appareils	34
7.7 Détermination de la courbe d'aimantation normale	34

CONTENTS

	Page
FOREWORD	7
PREFACE	7

INTRODUCTION

Clause	
1. Scope and object	9
2. Reproducibility	9

CHAPTER I: DETERMINATION OF THE MAGNETIC CHARACTERISTICS
BY THE RING METHOD

3. General	13
3.1 Object	13
3.2 Field of application	13
3.3 Test specimen	13
3.4 Windings	13
4. Methods of measurement	15
4.1 Magnetic field strength	15
4.2 Magnetic flux density	15
4.3 Connection of apparatus	17
4.4 Determination of normal magnetization curve	17
4.5 Determination of a complete hysteresis loop	17
4.6 Determination of remanent flux density	21
4.7 Determination of coercive field strength	21

CHAPTER II: DETERMINATION OF THE MAGNETIC PROPERTIES
BY THE PERMEAMETER METHOD

5. General	23
5.1 Object	23
5.2 Field of application	23
6. The NPL type permeameter	23
6.1 Principle of the permeameter	23
6.2 Test specimen	25
6.3 Search coils	25
6.4 Measurement of magnetic field strength	27
6.5 Measurement of magnetic flux density	27
6.6 Measurement of the uniformity of the magnetic flux in the test specimen	27
6.7 Connection of apparatus	29
6.8 Determination of the normal magnetization curve	29
6.9 Determination of the complete hysteresis loop	31
6.10 Determination of remanent flux density and coercive field strength	31
7. The Iliovici permeameter	33
7.1 Principle of permeameter	33
7.2 Test specimen	33
7.3 Search coil	33
7.4 Measurement of magnetic field strength	33
7.5 Measurement of magnetic flux density	33
7.6 Connection of apparatus	35
7.7 Determination of the normal magnetization curve	35

Articles	Pages
7.8 Détermination du cycle d'hystérésis complet	36
8. Perméamètre MH	36
8.1 Principe du perméamètre	36
8.2 Eprouvette	38
8.3 Bobines de mesure	38
8.4 Mesure du champ magnétique	38
8.5 Mesure de l'induction magnétique	40
8.6 Connexion des appareils	40
8.7 Détermination de la courbe d'aimantation normale	40
8.8 Détermination du cycle d'hystérésis complet	40
8.9 Détermination de l'induction rémanente et du champ coercitif	40
9. Perméamètre de Sanford-Bennett pour champs élevés	40
9.1 Principe du perméamètre	40
9.2 Eprouvette	42
9.3 Mesure du champ magnétique	42
9.4 Mesure de l'induction magnétique	42
9.5 Connexion des appareils	42
9.6 Détermination de la courbe d'aimantation normale	42
9.7 Détermination du cycle d'hystérésis complet	44
9.8 Détermination de l'induction rémanente et du champ coercitif	44
ANNEXE A – Modes d'étalonnage de l'intégrateur de flux	46
ANNEXE B – Mesure de la grandeur «surface × nombre de spires» de la bobine de mesure	50
FIGURES	52

Withdrawn

Clause	Page
7.8 Determination of the complete hysteresis loop	37
8. The MH permeameter	37
8.1 Principle of the permeameter	37
8.2 Test specimen	39
8.3 Search coils	39
8.4 Measurement of the magnetic field strength	39
8.5 Measurement of the magnetic flux density	41
8.6 Connection of apparatus	41
8.7 Determination of the normal magnetization curve	41
8.8 Determination of the complete hysteresis loop	41
8.9 Determination of the remanent flux density and coercive field strength	41
9. The Sanford-Bennett High H permeameter	41
9.1 Principle of the permeameter	41
9.2 Test specimen	43
9.3 Measurement of the magnetic field strength	43
9.4 Measurement of the magnetic flux density	43
9.5 Connection of apparatus	43
9.6 Determination of the normal magnetization curve	43
9.7 Determination of the complete hysteresis loop	45
9.8 Determination of the remanent flux density and coercive field strength	45
APPENDIX A – Methods of calibrating the flux integrator	47
APPENDIX B – Measurement of the effective area turns product of search coils	51
FIGURES	52

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

**Quatrième partie: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques
en courant continu des pièces massives en acier**

PRÉAMBULE

- 1) Les décisions ou accords officiels de la CEI en ce qui concerne les questions techniques, préparés par des Comités d'Etudes où sont représentés tous les Comités nationaux s'intéressant à ces questions, expriment dans la plus grande mesure possible un accord international sur les sujets examinés.
- 2) Ces décisions constituent des recommandations internationales et sont agréées comme telles par les Comités nationaux.
- 3) Dans le but d'encourager l'unification internationale, la CEI exprime le vœu que tous les Comités nationaux adoptent dans leurs règles nationales le texte de la recommandation de la CEI, dans la mesure où les conditions nationales le permettent. Toute divergence entre la recommandation de la CEI et la règle nationale correspondante doit, dans la mesure du possible, être indiquée en termes clairs dans cette dernière.

PRÉFACE

La présente norme a été établie par le Comité d'Etudes N° 68 de la CEI: Matériaux magnétiques tels qu'alliages et aciers.

Le premier projet fut discuté lors de la réunion tenue à Budapest en 1977. A la suite de cette réunion, un projet, document 68(Bureau Central)13, fut soumis à l'approbation des Comités nationaux suivant la Règle des Six Mois en mars 1978.

Les Comités nationaux des pays ci-après se sont prononcés explicitement en faveur de ce projet:

Afrique du Sud (Republic d')	Danemark	Japon
Australie	Egypte	Pologne
Autriche	Espagne	Royaume-Uni
Belgique	États Unis d'Amérique	Suède
Brésil	France	Union des Républiques
Canada	Italie	Socialistes soviétiques

Des modifications, document 68(Bureau Central)21, furent soumises à l'approbation des Comités nationaux suivant la Procédure des Deux Mois en mars 1980.

Les Comités nationaux des pays ci-après se sont prononcés explicitement en faveur de ces modifications:

Afrique du Sud (République d')	Etats-Unis d'Amérique	Suède
Autriche	France	Tchécoslovaquie
Belgique	Irlande	Turquie
Canada	Pologne	Union des Républiques
Danemark	Roumanie	Socialistes Soviétiques
Espagne		

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MAGNETIC MATERIALS

Part 4: Methods of measurement of the d.c. magnetic properties
of solid steels

FOREWORD

- 1) The formal decisions or agreements of the IEC on technical matters, prepared by Technical Committees on which all the National Committees having a special interest therein are represented, express, as nearly as possible, an international consensus of opinion on the subjects dealt with.
- 2) They have the form of recommendations for international use and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 3) In order to promote international unification, the IEC expresses the wish that all National Committees should adopt the text of the IEC recommendation for their national rules in so far as national conditions will permit. Any divergence between the IEC recommendation and the corresponding national rules should, as far as possible, be clearly indicated in the latter.

PREFACE

This standard has been prepared by IEC Technical Committee No. 68: Magnetic Alloys and Steels.

The first draft was discussed at the meeting held in Budapest in 1977. As a result of this meeting, a draft, Document 68(Central Office)13, was submitted to the National Committees for approval under the Six Months' Rule in March 1978.

The National Committees of the following countries voted explicitly in favour of this draft:

Australia	Egypt	Spain
Austria	France	Sweden
Belgium	Italy	Union of Soviet
Brazil	Japan	Socialist Republics
Canada	Poland	United Kingdom
Denmark	South Africa (Republic of)	United States of America

Amendments, Document 68(Central Office)21, were submitted to the National Committees for approval under the Two Months' Procedure in March 1980.

The National Committees of the following countries voted explicitly in favour of these amendments.

Austria	Ireland	Sweden
Belgium	Poland	Turkey
Canada	Romania	Union of Soviet
Czechoslovakia	South Africa (Republic of)	Socialist Republics
Denmark	Spain	United States of America
France		

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES

Quatrième partie: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques en courant continu des pièces massives en acier

INTRODUCTION

1. Domaine d'application et objet

La présente norme a pour objet de définir la terminologie et de spécifier les méthodes de mesure des propriétés magnétiques en courant continu des pièces massives en acier. Des barres d'épaisseur importante, les pièces moulées ou forgées, telles que définies sous la référence C1 et D1 du document classification, sont des exemples de pièces massives.

Deux méthodes ont été retenues:

- a) la méthode du tore en particulier pour les champs magnétiques d'intensité inférieure à 5 kA/m;
- b) la méthode du perméamètre. Différents perméamètres sont utilisés selon le domaine d'intensité de champ magnétique:
 - le perméamètre type NPL (National Physical Laboratory) pour les champs d'intensité comprise entre 2 kA/m et 200 kA/m;
 - le perméamètre Iliovici pour les champs d'intensité comprise entre 2 kA/m et 40 kA/m;
 - le perméamètre MH (Médium H) pour les champs d'intensité comprise entre 2 kA/m et 24 kA/m;
 - le perméamètre Sanford-Bennett pour champs élevés d'intensité comprise entre 8 kA/m et 400 kA/m.

Note. - Les méthodes décrites dans cette norme sont des méthodes d'essais dans lesquelles l'éprouvette est dans un circuit magnétique fermé. Il existe aussi des méthodes dans lesquelles l'éprouvette est dans un circuit magnétique ouvert.

2. Reproductibilité

La précision finale de l'appareillage d'essai est une fonction complexe dépendant des appareils de mesure et autres caractéristiques des conditions de mesure et des composants de l'équipement; il n'est donc pas toujours possible d'indiquer la précision absolue qui peut être atteinte. Particulièrement dans les méthodes du perméamètre: les paramètres de forme, les effets d'extrémité, les effets de coin, les variations de la longueur du circuit magnétique et de la section aussi bien que les caractéristiques d'hystérésis des culasses peuvent causer des différences importantes dans les résultats d'essai lorsque des échantillons provenant d'un même lot de matériau sont préparés et testés à l'aide des différents perméamètres. La meilleure utilisation de n'importe quel appareil est celle pour laquelle les facteurs d'erreur peuvent être limités à des valeurs tolérables. Cela est habituellement réalisé lorsque la coercitivité est raisonnablement importante (>1 kA/m) ou lorsque les inductions sont voisines de celles correspondant à une perméabilité maximale dans l'éprouvette.

MAGNETIC MATERIALS

Part 4: Methods of measurement of the d.c. magnetic properties of solid steels

INTRODUCTION

1. Scope and object

The object of this standard is to describe the terminology and to specify the methods of measuring the d.c. magnetic properties of solid steels. Examples of solid steels are: bars of substantial thickness, cast or forged solid steels as defined under references C1 and D1 of the classification document.

Two methods are used:

- a) the ring method particularly for magnetic field strengths of less than 5 kA/m;
- b) the permeameter method. Different permeameters are used according to the range of the magnetic field strength:
 - the NPL (National Physical Laboratory) type permeameter for field strengths of between 2 kA/m and 200 kA/m;
 - the Ilievici permeameter for field strengths of between 2 kA/m and 40 kA/m;
 - the MH (Medium H) permeameter for field strengths of between 2 kA/m and 24 kA/m;
 - the Sanford-Bennett (High H) permeameter for field strengths of between 8 kA/m and 400 kA/m.

Note. - The methods described in this standard are test methods in which the test specimen is in a closed magnetic circuit. Methods in which the test specimen is in an open magnetic circuit are existing.

2. Reproducibility

The ultimate accuracy of test equipment is a complex function dependent upon measuring instruments and other characteristics of measuring conditions and equipment; it is therefore not always possible to state the absolute accuracy that is attainable. Particularly in the permeameter methods: shape parameters, end effects, corner effects, variations in path length and cross-section, as well as hysteresis characteristics of the yokes can cause substantially different test results to be obtained when specimens from an identical batch of material are prepared and tested in the various permeameters. The best use of any apparatus is where these error factors can be limited to tolerable values. Usually that occurs where coercivity is reasonably large (>1 kA/m) or at inductions above those corresponding to maximum permeability in the test specimen.

Le résultat des mesures étant affecté par une variation de température, des précautions doivent être prises pour éviter un échauffement de l'éprouvette. Le domaine de la variation acceptable de température doit être spécifié.

Par ailleurs pour une méthode donnée, l'expérience indique la reproductibilité ou l'ordre de grandeur de l'erreur de mesure qui peut être prévue. Cette erreur dépend des erreurs escomptées des appareils de mesure. L'erreur totale de mesure de l'indication magnétique ou de l'intensité du champ magnétique normalement escomptée pour les différentes méthodes est inférieure ou égale à $\pm 2\%$ en utilisant les instruments de mesure dont l'erreur estimée est inférieure ou égale à $\pm 1\%$.

Withdrawn

As the result of the measurements is affected by changes in temperature, precautions must be taken to avoid heating the test specimen. The acceptable temperature shall be specified.

For a known method, experience shows the reproducibility or the size of the measurement error that can be expected. This error depends upon the estimated errors of the measuring instruments. The total measurement error of the measurement of the magnetic flux density or the magnetic field strength normally expected for the different methods is less than or equal to $\pm 2\%$ when using measuring instruments whose estimated measuring error is less than or equal to $\pm 1\%$.

Withdrawn

CHAPITRE I: DÉTERMINATION DES CARACTÉRISTIQUES MAGNÉTIQUES PAR LA MÉTHODE DU TORE

3. Généralités

3.1 Objet

Ce chapitre a pour objet la définition de la «méthode du tore» employée pour la détermination de la courbe d'aimantation normale et du cycle d'hystérésis.

3.2 Domaine d'application

Cette méthode est utilisée particulièrement pour les champs d'intensité inférieure à 5 kA/m. Cependant en prenant des précautions pour éviter un échauffement de l'éprouvette, cette méthode reste valable pour des champs magnétiques de valeur plus élevée.

3.3 Eprouvette

L'éprouvette est constituée par un tore homogène sans soudure, de section rectangulaire ou circulaire. L'aire de la section du tore sera déterminée par les dimensions du produit, l'uniformité des propriétés magnétiques, la sensibilité des instruments et l'espace requis pour les enroulements. L'aire de la section sera habituellement comprise entre 100 mm² et 500 mm².

Lors de l'usinage de l'éprouvette, veiller à éviter un écrouissage du matériau et en conséquence une altération des caractéristiques magnétiques. L'éprouvette peut être usinée par tournage suivi d'une légère rectification avec suffisamment de liquide de refroidissement pour éviter l'échauffement du matériau. Ebavurer les bords du tore.

Pour réduire l'effet des variations radiales de l'intensité du champ magnétique, la relation suivante s'applique:

$$D \leq 1,1 d \quad (1)$$

où:

D = diamètre extérieur de l'éprouvette, en mètres

d = diamètre intérieur de l'éprouvette, en mètres

Les dimensions de l'éprouvette doivent être déterminées par mesure des diamètres extérieur et intérieur du tore ainsi que l'épaisseur ou diamètre à l'aide d'un micromètre approprié ou un vernier. L'aire de la section moyenne doit être calculée avec une précision de $\pm 0,5\%$ au moins.

La longueur moyenne du circuit magnétique de l'éprouvette doit être également calculée avec une précision de $\pm 0,5\%$ au moins, à l'aide de la relation:

$$L = \pi \frac{D + d}{2} \quad (2)$$

où:

L = longueur moyenne du circuit magnétique de l'éprouvette, en mètres

3.4 Enroulements

Avant la réalisation des bobinages, et après avoir réalisé une connexion à la masse en vue de la vérification de l'isolation des enroulements, une mince couche d'isolant est à déposer sur le tore.

CHAPTER I: DETERMINATION OF THE MAGNETIC CHARACTERISTICS BY THE RING METHOD

3. General

3.1 Object

This chapter describes the ring method used to obtain the normal magnetization curve and the hysteresis loop.

3.2 Field of application

This method is used particularly for magnetic field strengths of less than 5 kA/m. However if care is taken to avoid heating the test specimen, this method may be used at higher magnetic field strengths.

3.3 Test specimen

The test specimen is a homogeneous unwelded ring of rectangular or circular cross-section. The cross-sectional area of the ring will be determined by the product dimensions, uniformity of magnetic properties, instrumentation sensitivity and space required for the test windings. Usually the cross-sectional area will be in the range of 100 mm² to 500 mm².

Care shall be taken in the machining of the test specimen to avoid work hardening of the material and hence alteration of the magnetic characteristics. The test specimen may be prepared by turning and finished by light grinding with sufficient coolant to prevent heating the material. The edges of the ring shall be deburred.

To reduce the effect of the radial variation of the magnetic field strength, the following relationship shall apply:

$$D \leq 1.1 d \quad (1)$$

where:

D = outside diameter of test specimen, in metres

d = inside diameter of test specimen, in metres

The dimensions of the test specimen shall be determined by measuring the outside and inside diameters of the ring together with the height or diameter using a suitable micrometer or vernier gauge. The mean cross-sectional area shall be calculated with an uncertainty of $\pm 0.5\%$ or better.

The mean magnetic path length of the test specimen shall also be calculated with an uncertainty of $\pm 0.5\%$ or better from the relationship:

$$L = \pi \frac{D + d}{2} \quad (2)$$

where:

L = mean magnetic path length of test specimen, in metres

3.4 Windings

Before winding, a connection shall be made to the core in order to check the insulation of the windings and then the ring should be overlaid with a thin layer of insulating material.

En premier lieu, un fil de cuivre isolé, enroulé uniformément tout le long de l'anneau constitue l'enroulement secondaire. Les dimensions de cet enroulement secondaire doivent être mesurées à l'aide d'un micromètre et la section moyenne A_s est calculée.

L'enroulement d'aimantation constitué par un fil de section suffisante pour supporter le courant maximal d'aimantation doit être ensuite enroulé en une ou plusieurs couches sur l'anneau avec un nombre de spires suffisant pour produire l'intensité de champ maximale spécifiée. L'enroulement d'aimantation peut être composé:

- a) d'un grand nombre de spires d'un fil unique appliqué uniformément et étroitement autour du tore entier, ou
- b) d'un nombre plus faible de spires d'un câble à multifils appliqué uniformément et étroitement autour du tore entier, les extrémités de chaque fil étant reliées entre elles de façon à donner l'effet d'une bobine à multicouches, ou
- c) d'un arrangement de conducteurs rigides ou de conducteurs en partie rigides et en partie flexibles, qui peut être ouvert pour mise en place du tore (comportant la bobine de flux et les isolants) et qui peut être ensuite refermé pour former un tore réparti uniformément autour du tore.

Si nécessaire, le tore bobiné est immergé dans un bain d'huile ou soumis à un courant d'air afin de le refroidir.

Note. – Avec les dispositifs décrits ci-dessus, employés avec une bobine de flux répartie uniformément, une erreur, qui peut être présente dans n'importe quel essai de tore, pourra être amplifiée et prendre une importance considérable. Cette erreur provient du fait qu'en bobinant une éprouvette annulaire d'une façon toroïdale, une spire effectivement circulaire de diamètre égal au diamètre moyen du tore, est ainsi produite.

Le flux entre les spires circulaires effectives de l'enroulement de magnétisation et de la bobine du flux, associée avec le flux parallèle à l'axe du tore, est ajouté ou soustrait du flux circonférentiel. Quand un câble à multifils est employé pour l'enroulement d'aimantation, le nombre de spires dans le primaire de cette inductance mutuelle supplémentaire est accru en proportion du nombre de fils, et l'erreur due à cette source peut atteindre plusieurs pour-cent, particulièrement aux fortes intensités de champ, quand la perméabilité du fer est réduite. Pour éliminer cette erreur, une spire peut être enroulée en retour sur le secondaire le long de la circonférence moyenne du tore ou, préférablement, le câble d'aimantation est à enrouler un nombre pair de couches, les couches alternées étant enroulées dans le sens des aiguilles d'une montre et dans le sens contraire.

4. Méthodes de mesure

4.1 Champ magnétique

L'intensité du courant d'aimantation est mesurée à l'aide d'un ampèremètre. La valeur du champ magnétique est calculée à partir de la relation suivante:

$$H = \frac{N_1 I}{L} \quad (3)$$

où:

- H = valeur du champ magnétique, en ampères par mètre
- N_1 = nombre de spires de l'enroulement d'aimantation du tore
- L = longueur moyenne du circuit magnétique, en mètres
- I = intensité du courant d'aimantation, en ampères

4.2 Induction magnétique

L'enroulement secondaire (bobine B) est relié à un intégrateur de flux* étalonné selon l'une des procédures définies à l'annexe A.

* L'intégrateur de flux peut être un galvanomètre balistique, un fluxmètre ou un intégrateur électronique.

Firstly, a secondary winding of insulated copper wire shall be wound evenly round the core. The dimensions of the secondary winding shall be measured with a micrometer and the mean cross-sectional area, A_s of the secondary winding is calculated.

A magnetizing winding of wire capable of carrying the maximum magnetizing current and of a sufficient number of turns to produce the maximum required magnetic field strength shall be evenly wound in one or more layers on the core. The magnetizing winding may consist of:

- a) a large number of turns of a single conductor applied closely and uniformly round the whole ring, or
- b) a smaller number of turns of a multicore cable applied closely and uniformly round the whole ring, the ends of the conductors in the individual cores being interconnected to give the effect of one multilayer winding, or
- c) an arrangement of rigid, or part rigid and part flexible, conductors which can be opened to admit the ring (carrying the secondary winding and insulation) and then closed to form a uniformly wound toroid round the ring.

If necessary, the wound ring is immersed in an oil bath or subjected to an air blast in order to cool it.

Note. – If the above arrangements are used with an uniformly distributed secondary winding, an error, which may be present in any ring test, is liable to be magnified and to become of considerable importance. This error arises from the fact that, in winding a ring specimen toroidally, an effective circular turn of diameter equal to the mean diameter of the ring is produced.

The flux between the effective circular turns of the magnetizing winding and secondary winding, associated with flux parallel to the axis of the ring, is added to, or subtracted from the circumferential flux. When a multiconductor cable is used for the magnetizing winding, the number of turns in the primary of this supplementary mutual inductance is increased in proportion to the number of cores, and the error from this source, particularly at high field-strengths where the permeability of the iron is reduced, may amount to several per cent. To eliminate this error a turn may be wound back on the secondary winding along the mean circumference of the ring, or, preferably, the magnetizing cable should be wound in pairs of layers, alternate layers being wound clockwise and anti-clockwise around the ring.

4. Methods of measurement

4.1 Magnetic field strength

The magnetizing current shall be measured with an ammeter.
The magnetic field strength shall be calculated from the following relationship:

$$H = \frac{N_1 I}{L} \quad (3)$$

where:

- H = magnetic field strength, in amperes per metre
- N_1 = number of turns of magnetizing winding of the ring
- L = mean magnetic path length, in metres
- I = magnetizing current, in amperes

4.2 Magnetic flux density

The secondary winding (B coil) shall be connected to a flux integrator *, the calibration of which shall be established in accordance with one of the procedures given in Appendix A.

* The flux integrator may be a ballistic galvanometer, fluxmeter or electronic charge integrator.

A condition que l'enroulement secondaire soit enroulé étroitement sur l'éprouvette, le flux de l'air inclus dans l'enroulement secondaire sera insignifiant pour la gamme de champs compris entre 0 à 4 kA/m et aucune correction ne sera nécessaire. Pour les valeurs élevées du champ magnétique, une correction pour le flux de l'air doit être appliquée selon l'équation 8.

4.3 Connexion des appareils

Les appareils sont connectés comme indiqué à la figure 1, page 52.

Une source de courant continu E (batterie ou source de courant continu stabilisé) est connectée à travers l'ampèremètre A , l'inverseur S_1 et le commutateur S_4 à l'enroulement d'aimantation N_1 du tore. Avec l'interrupteur S_5 fermé, le courant dans le circuit d'aimantation est réglé par la résistance R_1 . C'est le schéma du circuit d'aimantation pour la détermination de la courbe normale d'induction et pour la mesure des extrémités du cycle d'hystérésis. L'interrupteur S_5 , conjointement avec la résistance R_5 , est utilisé pour la détermination du cycle d'hystérésis complet.

Le circuit secondaire comprend l'enroulement secondaire N_2 (bobine B) relié à l'intégrateur de flux F à travers la résistance R_2 (réglage de sensibilité). La résistance R_4 est un shunt de réglage nécessaire avec certains types d'intégrateurs de flux.

4.4 Détermination de la courbe d'aimantation normale

L'éprouvette est soigneusement désaimantée à partir d'un champ d'intensité d'au moins 5 kA/m par une lente inversion du courant continu, que l'on réduit graduellement. Les éprouvettes qui ont été soumises à des champs d'intensité élevée sont avant essai démagnétisées à partir d'un champ de valeur suffisamment élevée (par exemple lors de la rectification sur plateau magnétique).

Note. - Pour que le champ magnétique puisse complètement pénétrer dans l'éprouvette la durée pour l'inversion devrait être supérieure à 2 s pour une section de 10 mm × 10 mm et 10 s pour une section de 20 mm × 20 mm.

L'intégrateur de flux doit être étalonné conformément à l'annexe A avec l'interrupteur S_5 fermé et le commutateur S_4 dans la position 1. Ensuite le commutateur S_4 doit être fermé en position 2 et un faible courant correspondant à une faible intensité de champ magnétique (voir équation 3) circule à travers le bobinage d'aimantation N_1 . Ce courant doit être inversé environ 10 fois à l'aide de l'inverseur S_1 de façon à maintenir le matériau dans un état cyclique régulier. L'inverseur S_2 peut être fermé durant l'opération pour maintenir à zéro l'intégrateur de flux. L'inverseur S_2 étant ouvert, l'indication de l'intégrateur de flux correspondant à l'inversion du champ magnétique doit être enregistrée et l'induction magnétique correspondante doit être déterminée.

En augmentant successivement le courant d'aimantation et en répétant cette procédure, des valeurs correspondantes de l'intensité de champ magnétique et de l'induction magnétique peuvent être obtenues, à partir desquelles une courbe d'aimantation normale peut être tracée.

Note. - Le courant d'aimantation ne doit jamais décroître durant les mesures, sinon l'éprouvette doit être désaimantée avant de refaire les mesures.

4.5 Détermination d'un cycle d'hystérésis complet

L'éprouvette est désaimantée et les extrémités du cycle d'hystérésis sont déterminées en mesurant les valeurs correspondantes du champ magnétique et de l'induction magnétique selon le paragraphe 4.4.

La partie PQ du cycle d'hystérésis (voir figure 2, page 52) est ensuite déterminée avec l'inverseur S_1 fermé en position 1 en ouvrant l'interrupteur S_5 , et en mesurant le champ magnétique correspondant et la modification de l'induction magnétique. En réglant la résistance R_5 , un

Provided that the secondary winding is wound closely on the test specimen, the air flux included in the secondary winding over the range of magnetic field strength 0 to 4 kA/m will be insignificant and no correction need be applied. At higher values of magnetic field strength, an air flux correction shall be applied in accordance with equation 8.

4.3 Connection of apparatus

The apparatus is connected as shown in Figure 1, page 52.

A source of direct current E (battery or stabilized d.c. supply) is connected through ammeter A , reversing switch S_1 and changeover switch S_4 to the magnetizing winding N_1 on the ring specimen. With switch S_5 closed, the current in the magnetizing circuit is controlled by resistor R_1 . This is the arrangement of the magnetizing circuit for the determination of the normal induction curve and for the measurement of the tips of hysteresis loops. Switch S_5 , together with resistor R_5 , is used in the determination of the complete hysteresis loop.

The secondary circuit comprises the secondary winding N_2 (B coil) connected to the flux integrator F through resistor R_2 (sensitivity control). Resistor R_4 is a shunt control required with some types of flux integrator.

4.4 Determination of normal magnetization curve

The specimen shall be carefully demagnetized from a magnetic field strength of not less than 5 kA/m by the slow reversal of a gradually reducing direct current. Test specimens which have been subjected to a higher magnetic field strength shall be demagnetized from a suitably high field before test (for example when machined using a magnetic chuck).

Note. – In order that the magnetic field may completely penetrate the test specimen, the duration of reversal should be greater than 2 s for a cross-section 10 mm × 10 mm and 10 s for a cross-section 20 mm × 20 mm.

With switch S_5 closed and changeover switch S_4 in position 1, the flux integrator shall be calibrated as described in Appendix A. Then changeover switch S_4 shall be closed in position 2 and a small current corresponding to a small magnetic field strength (see equation 3) passed through the magnetizing winding N_1 . The current shall be reversed about 10 times by means of reversing switch S_1 to bring the material into a steady cyclic state. Switch S_2 may be closed during this operation to maintain the flux integrator at zero. With switch S_2 open the flux integrator reading corresponding to the reversal of the magnetizing field shall be recorded and the corresponding magnetic flux density shall be calculated.

By successively increasing the magnetizing current and repeating this procedure, corresponding values of magnetic field strength and magnetic flux density may be obtained from which a normal induction curve may be plotted.

Note. – The magnetizing current must never be decreased during the measurements otherwise the test specimen must be demagnetized before resuming measurements.

4.5 Determination of a complete hysteresis loop

The test specimen shall be demagnetized and the tip points of the hysteresis loop shall be determined by measuring the corresponding values of magnetic field strength and magnetic flux density in accordance with Sub-clause 4.4.

Portion PQ of the hysteresis loop (see Figure 2, page 52) is then determined with switch S_1 closed in position 1 by opening switch S_5 , and measuring the corresponding magnetic field strength and change in magnetic flux density. By adjusting resistor R_5 a number of points on

nombre de points de la courbe PQ peut être obtenu. Le point Q est obtenu avec l'interrupteur S_5 fermé et en mesurant la modification de l'induction magnétique à l'ouverture de l'inverseur S_1 .

La valeur de l'intensité du champ magnétique en chaque point est calculée à partir de la valeur mesurée correspondante du courant passant (voir équation 3).

La valeur de l'induction magnétique en chaque point est calculée à partir de l'équation suivante:

$$B_{P'} = B_P - \Delta B \quad (4)$$

où:

$B_{P'}$ = induction magnétique au point P' de la courbe PQ, en teslas

B_P = induction magnétique à la pointe du cycle d'hystérésis, en teslas

ΔB = variation de l'induction magnétique mesurée, à l'ouverture de l'interrupteur S_5 , l'inverseur S_1 étant fermé en position 1, en teslas

La partie QS du cycle d'hystérésis est déterminée avec l'interrupteur S_5 ouvert et en fermant l'inverseur S_1 . Les modifications de l'intensité du champ magnétique et de l'induction magnétique sont mesurées en premier lieu avec l'inverseur S_1 en position ouverte et ensuite en le fermant à la position 2.

La valeur de l'intensité du champ magnétique en chaque point est calculée à partir de la valeur mesurée du courant circulant quand S_1 est fermé en position 2 (voir équation 3).

La valeur de l'induction magnétique pour chaque point est calculée à partir de l'équation suivante:

$$B_{Q'} = B_Q - \Delta B \quad (5)$$

où:

$B_{Q'}$ = induction magnétique sur la courbe QS, en teslas

B_Q = induction magnétique au point Q' , en teslas

ΔB = variation de l'induction magnétique mesurée, l'inverseur S_1 étant fermé en position 2 avec l'interrupteur S_5 ouvert, en teslas

Pour l'établissement du cycle d'hystérésis complet, la séquence des commutations doit être conforme à la procédure définie au tableau I, pour maintenir l'éprouvette dans un état cyclique régulier.