

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60404-1

Deuxième édition
Second edition
2000-08

Matériaux magnétiques –

**Partie 1:
Classification**

Magnetic materials –

**Part 1:
Classification**



Numéro de référence
Reference number
CEI/IEC 60404-1:2000

Numéros des publications

Depuis le 1er janvier 1997, les publications de la CEI sont numérotées à partir de 60000.

Publications consolidées

Les versions consolidées de certaines publications de la CEI incorporant les amendements sont disponibles. Par exemple, les numéros d'édition 1.0, 1.1 et 1.2 indiquent respectivement la publication de base, la publication de base incorporant l'amendement 1, et la publication de base incorporant les amendements 1 et 2.

Validité de la présente publication

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

Des renseignements relatifs à la date de reconfirmation de la publication sont disponibles dans le Catalogue de la CEI.

Les renseignements relatifs à des questions à l'étude et des travaux en cours entrepris par le comité technique qui a établi cette publication, ainsi que la liste des publications établies, se trouvent dans les documents ci-dessous:

- **«Site web» de la CEI***
- **Catalogue des publications de la CEI**
Publié annuellement et mis à jour régulièrement
(Catalogue en ligne)*
- **Bulletin de la CEI**
Disponible à la fois au «site web» de la CEI* et comme périodique imprimé

Terminologie, symboles graphiques et littéraux

En ce qui concerne la terminologie générale, le lecteur se reportera à la CEI 60050: *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI)*.

Pour les symboles graphiques, les symboles littéraux et les signes d'usage général approuvés par la CEI, le lecteur consultera la CEI 60027: *Symboles littéraux à utiliser en électrotechnique*, la CEI 60417: *Symboles graphiques utilisables sur le matériel. Index, relevé et compilation des feuilles individuelles*, et la CEI 60617: *Symboles graphiques pour schémas*.

* Voir adresse «site web» sur la page de titre.

Numbering

As from 1 January 1997 all IEC publications are issued with a designation in the 60000 series.

Consolidated publications

Consolidated versions of some IEC publications including amendments are available. For example, edition numbers 1.0, 1.1 and 1.2 refer, respectively, to the base publication, the base publication incorporating amendment 1 and the base publication incorporating amendments 1 and 2.

Validity 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 relating to the date of the reconfirmation of the publication is available in the IEC catalogue.

Information on the subjects under consideration and work in progress undertaken by the technical committee which has prepared this publication, as well as the list of publications issued, is to be found at the following IEC sources:

- **IEC web site***
- **Catalogue of IEC publications**
Published yearly with regular updates
(On-line catalogue)*
- **IEC Bulletin**
Available both at the IEC web site* and as a printed periodical

Terminology, graphical and letter symbols

For general terminology, readers are referred to IEC 60050: *International Electrotechnical Vocabulary (IEV)*.

For graphical symbols, and letter symbols and signs approved by the IEC for general use, readers are referred to publications IEC 60027: *Letter symbols to be used in electrical technology*, IEC 60417: *Graphical symbols for use on equipment. Index, survey and compilation of the single sheets* and IEC 60617: *Graphical symbols for diagrams*.

* See web site address on title page.

**NORME
INTERNATIONALE
INTERNATIONAL
STANDARD**

**CEI
IEC**

60404-1

Deuxième édition
Second edition
2000-08

Matériaux magnétiques –

**Partie 1:
Classification**

Magnetic materials –

**Part 1:
Classification**

© IEC 2000 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 mécanique, 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.

International Electrotechnical Commission
Telefax: +41 22 919 0300

3, rue de Varembé Geneva, Switzerland
e-mail: inmail@iec.ch IEC web site <http://www.iec.ch>



Commission Electrotechnique Internationale
International Electrotechnical Commission
Международная Электротехническая Комиссия

CODE PRIX
PRICE CODE

XA

Pour prix, voir catalogue en vigueur
For price, see current catalogue

SOMMAIRE

	Pages
AVANT-PROPOS	8
Articles	
1 Généralités	10
1.1 Domaine d'application et objet	10
1.2 Références normatives	10
1.3 Définitions	12
2 Matériaux magnétiques doux (coercitivité ≤ 1 kA/m)	14
2.1 Classe A – Fers	14
2.1.1 Généralités	14
2.1.2 Caractéristiques physiques	14
2.1.3 Applications principales	16
2.2 Classe B – Aciers doux à faible teneur en carbone	16
2.2.1 Classe B.1 – Produits massifs	16
2.2.2 Classe B.2 – Produits plats	18
2.3 Classe C – Aciers au silicium	22
2.3.1 Classe C.1 – Produits massifs	22
2.3.2 Classe C.2 – Produits plats	24
2.4 Classe D – Autres types d'aciers	36
2.4.1 Classe D.1 – Produits massifs	36
2.4.2 Classe D.2 – Produits plats	42
2.4.3 Classe D.3 – Aciers inoxydables	44
2.5 Classe E – Alliages fer-nickel	48
2.5.1 Classe E.1 – Teneur en nickel comprise entre 72 % et 83 %	48
2.5.2 Classe E.2 – Teneur en nickel comprise entre 54 % et 68 %	52
2.5.3 Classe E.3 – Teneur en nickel comprise entre 45 % et 50 %	54
2.5.4 Classe E.4 – Teneur en nickel comprise entre 35 % et 40 %	58
2.5.5 Classe E.5 – Teneur en nickel comprise entre 29 % et 33 %	60
2.6 Classe F – Alliages fer-cobalt	62
2.6.1 Classe F.1 – Teneur en cobalt comprise entre 47 % et 50 %	62
2.6.2 Classe F.2 – Teneur en cobalt de 35 %	66
2.6.3 Classe F.3 – Teneur en cobalt entre 23 % et 27 %	68
2.7 Classe G – Autres alliages	70
2.7.1 Classe G.1 – Alliages fer-aluminium	70
2.7.2 Classe G.2 – Alliages fer-aluminium-silicium	72
2.8 Classe H – Matériaux magnétiques doux obtenus par les techniques de la métallurgie des poudres	74
2.8.1 Classe H.1 – Ferrites doux	74
2.8.2 Classe H.2 – Matériaux magnétiques doux frittés	78
2.8.3 Classe H.3 – Poudres composites	80
2.9 Classe I – Matériaux magnétiques doux amorphes	82
2.9.1 Classe I.1 – Alliages à base fer	82
2.9.2 Classe I.2 – Alliages à base cobalt	84
2.9.3 Classe I.3 – Alliages à base nickel	88

CONTENTS

	Page
FOREWORD	9
Clause	
1 General.....	11
1.1 Scope and object	11
1.2 Normative references	11
1.3 Definitions	13
2 Magnetically soft materials (coercivity ≤ 1 kA/m).....	15
2.1 Class A – Irons	15
2.1.1 General.....	15
2.1.2 Physical characteristics	15
2.1.3 Main applications	17
2.2 Class B – Low carbon mild steels	17
2.2.1 Class B.1 – Bulk material	17
2.2.2 Class B.2 – Flat material	19
2.3 Class C – Silicon steels.....	23
2.3.1 Class C.1 – Bulk material.....	23
2.3.2 Class C.2 – Flat material	25
2.4 Class D – Other steels	37
2.4.1 Class D.1 – Bulk material	37
2.4.2 Class D.2 – Flat material	43
2.4.3 Class D.3 – Stainless steels	45
2.5 Class E – Nickel-iron alloys.....	49
2.5.1 Class E.1 – Nickel content 72 % to 83 %	49
2.5.2 Class E.2 – Nickel content 54 % to 68 %	53
2.5.3 Class E.3 – Nickel content 45 % to 50 %	55
2.5.4 Class E.4 – Nickel content 35 % to 40 %	59
2.5.5 Class E.5 – Nickel content 29 % to 33 %	61
2.6 Class F – Iron-cobalt alloys	63
2.6.1 Class F.1 – Cobalt content 47 % to 50 %	63
2.6.2 Class F.2 – Cobalt content 35 %.....	67
2.6.3 Class F.3 – Cobalt content 23 % to 27 %	69
2.7 Class G – Other alloys	71
2.7.1 Class G.1 – Aluminium-iron alloys	71
2.7.2 Class G.2 – Aluminium-silicon-iron alloys	73
2.8 Class H – Magnetically soft materials made by powder metallurgical techniques	75
2.8.1 Class H.1 – Soft ferrites	75
2.8.2 Class H.2 – Magnetically soft sintered materials	79
2.8.3 Class H.3 – Powder composites	81
2.9 Class I – Amorphous soft magnetic materials	83
2.9.1 Class I.1 – Iron-based alloys	83
2.9.2 Class I.2 – Cobalt-based alloys	85
2.9.3 Class I.3 – Nickel-based alloys	89

Articles	Pages
3 Matériaux magnétiques durs (coercitivité >1 kA/m).....	88
3.1 Classe Q – Alliages magnétostrictifs – Alliages fer-terres rares (classe Q.1).....	88
3.1.1 Généralités	88
3.1.2 Caractéristiques physiques.....	90
3.1.3 Applications principales.....	92
3.2 Classe R – Alliages magnétiques durs.....	92
3.2.1 Classe R.1 – Alliages aluminium-nickel-cobalt-fer-titane	92
3.2.2 Classe R.3 – Alliages fer-cobalt-vanadium-chrome	94
3.2.3 Classe R.5 – Alliages de terres rares-cobalt (RE-Co).....	96
3.2.4 Classe R.6 – Alliages chrome-fer-cobalt	98
3.2.5 Classe R.7 – Alliages de terres rares-fer-bore	100
3.3 Classe S – Céramiques magnétiques dures – Ferrites durs (Classe S.1).....	102
3.3.1 Généralités	102
3.3.2 Caractéristiques physiques.....	104
3.3.3 Applications principales.....	104
3.4 Classe T – Autres matériaux magnétiques durs – Aciers martensitiques (Classe T.1).....	104
3.4.1 Généralités	104
3.4.2 Caractéristiques physiques.....	106
3.4.3 Applications principales.....	106
3.5 Classe U – Matériaux magnétiques durs agglomérés.....	106
3.5.1 Classe U.1 – Aimants agglomérés aluminium-nickel-cobalt-fer-titane	108
3.5.2 Classe U.2 – Aimants agglomérés terres rares-cobalt.....	108
3.5.3 Classe U.3 – Aimants agglomérés néodyme-fer-bore.....	110
3.5.4 Classe U.4 – Ferrites durs agglomérés.....	112
Tableau 1 – Gammes de composition chimique	14
Tableau 2 – Gammes des valeurs spécifiées des caractéristiques magnétiques.....	16
Tableau 3 – Gammes des valeurs types des caractéristiques mécaniques et magnétiques....	18
Tableau 4 – Gammes des valeurs spécifiées des pertes totales spécifiques.....	20
Tableau 5 – Gammes des valeurs spécifiées des caractéristiques magnétiques et électriques.....	22
Tableau 6 – Gammes des valeurs spécifiées des pertes totales spécifiques.....	26
Tableau 7 – Gammes des valeurs spécifiées des pertes totales spécifiques maximales	28
Tableau 8 – Gammes des valeurs types des pertes totales spécifiques maximales.....	30
Tableau 9 – Valeurs spécifiées des pertes totales spécifiques maximales	32
Tableau 10 – Valeurs types des caractéristiques mécaniques et magnétiques pour l'épaisseur de 0,50 mm.....	34
Tableau 11 – Valeurs types des caractéristiques magnétiques	36
Tableau 12 – Gammes types des caractéristiques mécaniques et magnétiques.....	38
Tableau 13 – Gammes types des caractéristiques mécaniques	40
Tableau 14 – Gammes des valeurs spécifiées des caractéristiques mécaniques et magnétiques des produits laminés à chaud.....	44
Tableau 15 – Gammes des valeurs spécifiées des caractéristiques mécaniques et magnétiques des produits laminés à froid	44
Tableau 16 – Gammes de la composition chimique.....	46

Clause	Page
3 Magnetically hard materials (coercivity >1 kA/m)	89
3.1 Class Q – Magnetostrictive alloys – Rare earth iron alloys (Class Q.1).....	89
3.1.1 General.....	89
3.1.2 Physical characteristics	91
3.1.3 Main applications	93
3.2 Class R – Magnetically hard alloys	93
3.2.1 Class R.1 – Alloys of aluminium-nickel-cobalt-iron-titanium.....	93
3.2.2 Class R.3 – Iron-cobalt-vanadium-chromium alloys.....	95
3.2.3 Class R.5 – Rare earth cobalt (RE-Co) alloys	97
3.2.4 Class R.6 – Chromium-iron-cobalt alloys	99
3.2.5 Class R.7 – Rare earth iron boron alloys.....	101
3.3 Class S – Magnetically hard ceramics – Hard ferrites (Class S.1)	103
3.3.1 General.....	103
3.3.2 Physical characteristics	105
3.3.3 Main applications	105
3.4 Class T – Other magnetically hard materials – Martensitic steels (Class T.1)	105
3.4.1 General.....	105
3.4.2 Physical characteristics	107
3.4.3 Main applications	107
3.5 Class U – Bonded magnetically hard materials	107
3.5.1 Class U.1 – Bonded aluminium-nickel-cobalt-iron-titanium magnets	109
3.5.2 Class U.2 – Bonded rare earth cobalt magnets	109
3.5.3 Class U.3 – Bonded neodymium-iron-boron magnets	111
3.5.4 Class U.4 – Bonded hard ferrites.....	113
Table 1 – Ranges of chemical composition	15
Table 2 – Ranges of specified values for magnetic properties	17
Table 3 – Ranges of typical values of magnetic and mechanical properties	19
Table 4 – Ranges of specified values of maximum specific total loss	21
Table 5 – Ranges of specified values for magnetic and electric properties.....	23
Table 6 – Ranges of specified values of maximum specific total loss	27
Table 7 – Ranges of specified values of maximum specific total loss	29
Table 8 – Ranges of typical values of maximum specific loss	31
Table 9 – Specified values of maximum specific total loss.....	33
Table 10 – Typical values of mechanical and magnetic properties for the thickness of 0,50 mm.....	35
Table 11 – Typical values of magnetic properties	37
Table 12 – Typical ranges of magnetic and mechanical properties	39
Table 13 – Typical ranges of mechanical properties	41
Table 14 – Ranges of specified values of mechanical and magnetic characteristics of hot-rolled products.....	45
Table 15 – Ranges of specified values of mechanical and magnetic characteristics of cold-rolled products	45
Table 16 – Ranges of chemical composition	47

Tableau 17 – Caractéristiques magnétiques types des matériaux à l'état fini	48
Tableau 18 – Caractéristiques magnétiques spécifiées des matériaux à cycle d'hystérésis rond	50
Tableau 19 – Caractéristiques magnétiques types des matériaux à cycle d'hystérésis plat.....	50
Tableau 20 – Caractéristiques magnétiques types des matériaux à cycle d'hystérésis rectangulaire	52
Tableau 21 – Caractéristiques magnétiques types des matériaux à cycle d'hystérésis rond ...	54
Tableau 22 – Caractéristiques magnétiques types des matériaux à cycle d'hystérésis plat.....	54
Tableau 23 – Caractéristiques magnétiques spécifiées du matériau à cycle d'hystérésis rond.....	56
Tableau 24 – Caractéristiques magnétiques types des matériaux à cycle d'hystérésis plat.....	58
Tableau 25 – Caractéristiques magnétiques types des matériaux à cycle d'hystérésis rectangulaire	58
Tableau 26 – Caractéristiques magnétiques spécifiées à l'état fini	60
Tableau 27 – Caractéristiques magnétiques typiques	62
Tableau 28 – Gammes des caractéristiques magnétiques spécifiées des matériaux à cycle d'hystérésis rond.....	64
Tableau 29 – Caractéristiques magnétiques types des matériaux à cycle d'hystérésis rectangulaire	66
Tableau 30 – Caractéristiques magnétiques spécifiées	68
Tableau 31 – Caractéristiques magnétiques spécifiées	70
Tableau 32 – Caractéristiques types des ferrites Mn-Zn.....	76
Tableau 33 – Caractéristiques types des ferrites Ni-Zn	76
Tableau 34 – Gammes des caractéristiques spécifiées	78
Tableau 35 – Caractéristiques physiques et magnétiques types	80
Tableau 36 – Caractéristiques physiques et magnétiques types	82
Tableau 37 – Caractéristiques physiques et magnétiques types	84
Tableau 38 – Caractéristiques physiques types.....	90
Tableau 39 – Gammes des caractéristiques magnétiques spécifiées.....	94
Tableau 40 – Valeurs spécifiées des caractéristiques magnétiques.....	96
Tableau 41 – Gammes des caractéristiques magnétiques et de la masse volumique des matériaux frittés.....	98
Tableau 42 – Gammes des caractéristiques magnétiques spécifiées.....	100
Tableau 43 – Gammes des caractéristiques magnétiques spécifiées et de la masse volumique des alliages anisotropes RE-FeB	102
Tableau 44 – Gammes des caractéristiques magnétiques spécifiées.....	104
Tableau 45 – Caractéristiques magnétiques types	106
Tableau 46 – Valeurs spécifiées des caractéristiques magnétiques.....	108
Tableau 47 – Valeurs spécifiées des caractéristiques magnétiques.....	110
Tableau 48 – Gammes de caractéristiques physiques et magnétiques types	112
Tableau 49 – Gammes des caractéristiques magnétiques spécifiées.....	114

Table 17 – Typical magnetic properties of materials in the fully processed state	49
Table 18 – Specified magnetic properties of material with a round hysteresis loop.....	51
Table 19 – Typical magnetic properties of material with a flat hysteresis loop	51
Table 20 – Typical magnetic properties of material with a rectangular hysteresis loop	53
Table 21 – Typical magnetic properties of material with a round hysteresis loop	55
Table 22 – Typical magnetic properties of material with a flat hysteresis loop	55
Table 23 – Specified magnetic properties of material with a round hysteresis loop.....	57
Table 24 – Typical magnetic properties of material with a flat hysteresis loop	59
Table 25 – Typical magnetic properties of material with a rectangular hysteresis loop	59
Table 26 – Specified magnetic properties of materials in the fully processed state.....	61
Table 27 – Typical magnetic properties	63
Table 28 – Ranges of specified magnetic properties of material with a round hysteresis loop.....	65
Table 29 – Typical magnetic properties of material with a rectangular hysteresis loop	67
Table 30 – Specified magnetic properties	69
Table 31 – Specified magnetic properties	71
Table 32 – Typical properties for Mn-Zn ferrites	77
Table 33 – Typical properties for Ni-Zn ferrites	77
Table 34 – Ranges of specified properties	79
Table 35 – Typical physical and magnetic properties	81
Table 36 – Typical physical and magnetic properties	83
Table 37 – Typical physical and magnetic properties	85
Table 38 – Typical physical properties	91
Table 39 – Ranges of specified magnetic properties	95
Table 40 – Specified values of magnetic properties	97
Table 41 – Ranges of specified magnetic properties and density of sintered material	99
Table 42 – Ranges of specified magnetic properties	101
Table 43 – Ranges of specified magnetic properties and density for anisotropic RE-FeB alloys.....	103
Table 44 – Ranges of specified values of magnetic properties.....	105
Table 45 – Typical magnetic properties.....	107
Table 46 – Specified values of magnetic properties.....	109
Table 47 – Specified values of magnetic properties.....	111
Table 48 – Ranges of typical physical and magnetic properties	113
Table 49 – Ranges of specified magnetic properties	115

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

Partie 1: Classification

AVANT-PROPOS

- 1) La CEI (Commission Électrotechnique Internationale) est une organisation mondiale de normalisation composée de l'ensemble des comités électrotechniques nationaux (Comités nationaux de la CEI). La CEI 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, la CEI, entre autres activités, publie des Normes internationales. 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 la CEI, participent également aux travaux. La CEI 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 la CEI concernant les questions techniques représentent, dans la mesure du possible, un accord international sur les sujets étudiés, étant donné que les Comités nationaux intéressés sont représentés dans chaque comité d'études.
- 3) Les documents produits se présentent sous la forme de recommandations internationales. Ils sont publiés comme normes, spécifications techniques, rapports techniques ou guides et agréés comme tels par les Comités nationaux.
- 4) Dans le but d'encourager l'unification internationale, les Comités nationaux de la CEI s'engagent à appliquer de façon transparente, dans toute la mesure possible, les Normes internationales de la CEI dans leurs normes nationales et régionales. Toute divergence entre la norme de la CEI et la norme nationale ou régionale correspondante doit être indiquée en termes clairs dans cette dernière.
- 5) La CEI n'a fixé aucune procédure concernant le marquage comme indication d'approbation et sa responsabilité n'est pas engagée quand un matériel est déclaré conforme à l'une de ses normes.
- 6) L'attention est attirée sur le fait que certains des éléments de la présente Norme internationale peuvent faire l'objet de droits de propriété intellectuelle ou de droits analogues. La CEI ne saurait être tenue pour responsable de ne pas avoir identifié de tels droits de propriété et de ne pas avoir signalé leur existence.

La Norme internationale CEI 60404-1 a été établie par le comité d'études 68 de la CEI: Matériaux magnétiques tels qu'alliages et aciers.

Cette édition annule et remplace la première édition parue en 1979, dont elle constitue une révision technique.

Le texte de cette norme est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
68/214/FDIS	68/216/RVD

Le rapport de vote indiqué dans le tableau ci-dessus donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

Cette publication a été rédigée selon les Directives ISO/CEI, Partie 3.

Le comité a décidé que le contenu de cette publication ne sera pas modifié avant 2009. A cette date, la publication sera

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

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

MAGNETIC MATERIALS –**Part 1: Classification****FOREWORD**

- 1) The IEC (International Electrotechnical Commission) is a worldwide organization for standardization comprising all national electrotechnical committees (IEC National Committees). The object of the 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, the IEC publishes International Standards. 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. The 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 the 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 National Committees.
- 3) The documents produced have the form of recommendations for international use and are published in the form of standards, technical specifications, technical reports or guides and they are accepted by the National Committees in that sense.
- 4) In order to promote international unification, IEC National Committees undertake to apply IEC International Standards transparently to the maximum extent possible in their national and regional standards. Any divergence between the IEC Standard and the corresponding national or regional standard shall be clearly indicated in the latter.
- 5) The IEC provides no marking procedure to indicate its approval and cannot be rendered responsible for any equipment declared to be in conformity with one of its standards.
- 6) Attention is drawn to the possibility that some of the elements of this International Standard may be the subject of patent rights. The IEC shall not be held responsible for identifying any or all such patent rights.

International Standard IEC 60404-1 has been prepared by IEC technical committee 68: Magnetic alloys and steels.

This second edition cancels and replaces the first edition published in 1979 and constitutes a technical revision.

The text of this standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
68/214/FDIS	68/216/RVD

Full information on the voting for the approval of this standard can be found in the report on voting indicated in the above table.

This publication has been drafted in accordance with the ISO/IEC Directives, Part 3.

The committee has decided that the contents of this publication will remain unchanged until 2009. At this date, the publication will be

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

MATÉRIAUX MAGNÉTIQUES –

Partie 1: Classification

1 Généralités

1.1 Domaine d'application et objet

La présente norme a pour objet la classification des matériaux magnétiques disponibles commercialement.

Le terme «matériaux magnétiques» décrit les substances dont l'application exige l'existence de caractéristiques ferromagnétiques ou ferrimagnétiques.

Dans la présente norme, la classification des matériaux magnétiques est basée sur l'existence généralement reconnue de deux groupes principaux de produits:

- les matériaux magnétiques doux (coercitivité $\leq 1\,000$ A/m);
- les matériaux magnétiques durs (coercitivité $> 1\,000$ A/m).

A l'intérieur de ces groupes principaux, la classification reconnaît lorsque cela est approprié les caractéristiques suivantes:

- l'élément principal d'alliage et l'état métallurgique et les caractéristiques physiques du matériau;
- lorsque cela est possible et réalisable pratiquement, la relation entre ces caractéristiques est identifiée.

Une classification selon les domaines spécifiques d'application ne peut être appliquée à tous les matériaux, car différents matériaux peuvent bien souvent être utilisés pour la même application en fonction des caractéristiques requises.

1.2 Références normatives

Les documents normatifs suivants contiennent des dispositions qui, par suite de la référence qui y est faite, constituent des dispositions valables pour la présente partie de la CEI 60404. Pour les références datées, les amendements ultérieurs ou les révisions de ces publications ne s'appliquent pas. Toutefois, les parties prenantes aux accords fondés sur la présente partie de la CEI 60404 sont invitées à rechercher la possibilité d'appliquer les éditions les plus récentes des documents normatifs indiqués ci-après. Pour les références non datées, la dernière édition du document normatif en référence s'applique. Les membres de la CEI et de l'ISO possèdent le registre des Normes internationales en vigueur.

CEI 60050(121):1998, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Partie 121: Electro-magnétisme*

CEI 60050(151):1978, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 151: Dispositifs électriques et magnétiques*

CEI 60050(221):1990, *Vocabulaire Electrotechnique International (VEI) – Chapitre 221: Matériaux et composants magnétiques*

CEI 60401:1993, *Matériaux ferrites – Guide relatif au format des données figurant dans les catalogues des fabricants de noyaux pour transformateurs et bobines d'inductance*

MAGNETIC MATERIALS –

Part 1: Classification

1 General

1.1 Scope and object

This standard is intended to classify commercially available magnetic materials.

The term "magnetic materials" denotes substances where the application requires the existence of ferromagnetic or ferrimagnetic properties.

In this standard, the classification of magnetic materials is based upon the generally recognized existence of two main groups of products:

- soft magnetic materials (coercivity $\leq 1\,000$ A/m);
- hard magnetic materials (coercivity $> 1\,000$ A/m).

Within these main groups, the classification when appropriate recognizes the following characteristics:

- the main alloying element and the metallurgical state and physical properties of the material;
- when possible and convenient, the relationship between these characteristics is identified.

A classification by specific areas of application cannot be applied to all materials because different materials can very often be used for the same application depending on the characteristics required.

1.2 Normative references

The following normative documents contain provisions which, through reference in this text, constitute provisions of this part of IEC 60404. For dated references, subsequent amendments to, or revisions of, any of these publications do not apply. However, parties to agreements based on this part of IEC 60404 are encouraged to investigate the possibility of applying the most recent editions of the normative documents indicated below. For undated references, the latest edition of the normative document referred to applies. Members of IEC and ISO maintain registers of currently valid International Standards.

IEC 60050(121):1998, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Part 121: Electromagnetism*

IEC 60050(151):1978, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 151: Electrical and magnetic devices*

IEC 60050(221):1990, *International Electrotechnical Vocabulary (IEV) – Chapter 221: Magnetic materials and components*

IEC 60401:1993, *Ferrite materials – Guide on the format of data appearing in manufacturers' catalogues of transformer and inductor cores*

CEI 60404 (toutes les parties), *Matériaux magnétiques*

CEI 60404-2:1996, *Matériaux magnétiques – Partie 2: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques des tôles et bandes magnétiques au moyen d'un cadre Eptsein*

CEI 60404-3:1992, *Matériaux magnétiques – Partie 3: Méthodes de mesure des caractéristiques magnétiques des tôles et feuillards magnétiques à l'aide de l'essai sur tôle unique*

CEI 60404-4:1995, *Matériaux magnétiques – Partie 4: Méthodes de mesure en courant continu des propriétés magnétiques du fer et de l'acier*

CEI 60404-6:1986, *Matériaux magnétiques – Sixième partie: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques des alliages magnétiques doux fer-nickel isotropes, types E1, E3 et E4*

CEI 60404-7:1982, *Matériaux magnétiques – Septième partie: Méthode de mesure du champ coercitif des matériaux magnétiques en circuit magnétique ouvert*

CEI 60404-8-1, *Matériaux magnétiques – Huitième partie: Spécifications pour matériaux particuliers – Section un: Spécifications normales des matériaux magnétiquement durs*

CEI 60404-8-2:1998, *Matériaux magnétiques – Partie 8-2: Spécifications pour matériaux particuliers – Tôles magnétiques en acier allié, laminées à froid et livrées à l'état semi-fini*

CEI 60404-8-3:1998, *Matériaux magnétiques – Partie 8-3: Spécifications pour matériaux particuliers – Tôles magnétiques en acier non allié, laminées à froid et livrées à l'état semi-fini*

CEI 60404-8-4:1998, *Matériaux magnétiques – Partie 8-4: Spécifications pour matériaux particuliers – Tôles magnétiques en acier à grains non orientés, laminées à froid et livrées à l'état fini*

CEI 60404-8-5:1989, *Matériaux magnétiques – Huitième partie: Spécifications pour matériaux particuliers – Section 5: Spécification des tôles en acier à caractéristiques mécaniques et perméabilité magnétique garanties*

CEI 60404-8-6:1999, *Matériaux magnétiques – Partie 8-6: Spécifications pour matériaux particuliers – Matériaux métalliques magnétiquement doux*

CEI 60404-8-7:1998, *Matériaux magnétiques – Partie 8-7: Spécifications pour matériaux particuliers – Tôles magnétiques en acier à grains orientés, laminées à froid et livrées à l'état fini*

CEI 60404-8-8:1991, *Matériaux magnétiques – Partie 8: Spécifications pour matériaux particuliers – Section 8: Spécification des tôles magnétiques extra-minces en acier pour utilisation à moyennes fréquences*

CEI 60404-8-9:1994, *Matériaux magnétiques – Partie 8: Spécifications pour matériaux particuliers – Section 9: Spécification des matériaux magnétiques doux frittés*

CEI 60404-8-10:1994, *Matériaux magnétiques – Partie 8: Spécifications pour matériaux particuliers – Section 10: Spécification des matériaux magnétiques (fer et acier) pour relais*

CEI 60404-10:1988, *Matériaux magnétiques – Dixième partie: Méthodes de mesure des propriétés magnétiques à fréquences moyennes des tôles et feuillards magnétiques en acier*

ISO 4948-1:1982, *Aciers – Classification – Partie 1: Classification des aciers en aciers alliés et en aciers non alliés basée sur la composition chimique*

1.3 Définitions

Les définitions relatives aux différents termes utilisés dans la présente partie de la CEI 60404 sont définies dans la CEI 60050(121), la CEI 60050(151), la CEI 60050(221) et dans les normes de produits de la série de la 60404-8.

IEC 60404 (all parts), *Magnetic materials*

IEC 60404-2:1996, *Magnetic materials – Part 2: Methods of measurement of the magnetic properties of electrical steel sheet and strip by means of an Epstein frame*

IEC 60404-3:1992, *Magnetic materials – Part 3: Methods of measurement of the magnetic properties of magnetic sheet and strip by means of a single sheet tester*

IEC 60404-4:1995, *Magnetic materials – Part 4: Methods of measurement of d.c. magnetic properties of iron and steel*

IEC 60404-6:1986, *Magnetic materials – Part 6: Methods of measurement of the magnetic properties of isotropic nickel-iron soft magnetic alloys, types E1, E3 and E4*

IEC 60404-7:1982, *Magnetic materials – Part 7: Method of measurement of the coercivity of magnetic materials in an open circuit*

IEC 60404-8-1, *Magnetic materials – Part 8: Specifications for individual materials – Section one: Standard specifications for magnetically hard materials*

IEC 60404-8-2:1998, *Magnetic materials – Part 8-2: Specifications for individual materials – Cold-rolled electrical alloyed steel sheet and strip delivered in the semi-processed state*

IEC 60404-8-3:1998, *Magnetic materials – Part 8-3: Specifications for individual materials – Cold-rolled electrical non-alloyed steel sheet and strip delivered in the semi-processed state*

IEC 60404-8-4:1998, *Magnetic materials – Part 8-4: Specifications for individual materials – Cold-rolled non-oriented electrical steel sheet and strip delivered in the fully processed state*

IEC 60404-8-5:1989, *Magnetic materials – Part 8: Specifications for individual materials – Section five: Specification for steel sheet and strip with specified mechanical properties and magnetic permeability*

IEC 60404-8-6:1999, *Magnetic materials – Part 8-6: Specifications for individual materials – Soft magnetic metallic materials*

IEC 60404-8-7:1998, *Magnetic materials – Part 8-7: Specifications for individual materials – Cold-rolled grain-oriented electrical steel sheet and strip delivered in the fully processed state*

IEC 60404-8-8:1991, *Magnetic materials – Part 8: Specifications for individual materials – Section 8: Specification for thin magnetic steel strip for use at medium frequencies*

IEC 60404-8-9:1994, *Magnetic materials – Part 8: Specifications for individual materials – Section 9: Standard specifications for sintered soft magnetic materials*

IEC 60404-8-10:1994, *Magnetic materials – Part 8: Specifications for individual materials – Section 10: Specification for magnetic materials (iron and steel) for use in relays*

IEC 60404-10:1988, *Magnetic materials – Part 10: Methods of measurement of magnetic properties of magnetic steel sheet and strip at medium frequencies*

ISO 4948-1:1982, *Steels – Classification – Classification of steels into unalloyed and alloy steels based on chemical composition*

1.3 Definitions

The definitions relating to the various terms used in this part of IEC 60404 are defined in IEC 60050(121), IEC 60050(151), IEC 60050(221) and in the product standards of the IEC 60404-8 series.

2 Matériaux magnétiques doux (coercitivité ≤ 1 kA/m)

2.1 Classe A – Fers

2.1.1 Généralités

Ces matériaux sont couverts par les CEI 60404-8-6 et la CEI 60404-8-10.

2.1.1.1 Composition chimique

Le constituant de base de ces matériaux est le fer et ils sont souvent appelés «fer commercialement pur» ou «fer doux magnétique». Les éléments qui ont un effet défavorable sur la rémanence magnétique, la coercitivité, la polarisation de saturation et la stabilité des propriétés magnétiques sont maintenus à un niveau permettant d'obtenir les caractéristiques requises pour l'utilisation envisagée. Les teneurs en éléments les plus importants, autres que le fer, quand ils sont présents dans ces matériaux, se situent de manière caractéristique dans les gammes de valeurs du tableau 1.

Tableau 1 – Gammes de composition chimique

C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	V
%	%	%	%	%	%	%	%
Jusqu'à 0,03	Jusqu'à 0,1	0,03 à 0,2	Jusqu'à 0,015*	Jusqu'à 0,03*	Jusqu'à 0,08	Jusqu'à 0,1	Jusqu'à 0,1
* Pour une meilleure usinabilité, les limites supérieures de P et de S peuvent dépasser les valeurs indiquées dans ce tableau.							

2.1.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est fondée sur les valeurs de coercitivité.

2.1.1.3 Modes de présentation disponibles

Ces matériaux sont disponibles sous des formes très variées. Ils peuvent être livrés sous forme de brames, billettes, lingots ou pièces forgées; barres laminées à chaud de section rectangulaire ou carrée; fils machine de section circulaire, hexagonale ou octogonale; barres et fils après laminage ou étirage à froid et tôles ou bandes laminées à chaud ou à froid.

2.1.2 Caractéristiques physiques

Outre les valeurs de coercitivité, une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: polarisation magnétique de saturation, polarisation magnétique pour diverses valeurs d'intensité du champ magnétique (à partir de laquelle peut être dérivée la perméabilité), stabilité des caractéristiques dans le temps;
- mécaniques: dureté, aptitude au poinçonnage, usinabilité, aptitude à l'emboutissage, résistance à la traction;
- état métallurgique: formé à chaud ou à froid, forgé, embouti, à l'état fini, c'est-à-dire ayant subi un recuit final.

NOTE Pour les matériaux non livrés à l'état fini, la sous-classification est basée sur la coercitivité mesurée après le traitement thermique effectué conformément aux exigences de la norme de produit ou aux recommandations du producteur.

2 Magnetically soft materials (coercivity ≤ 1 kA/m)

2.1 Class A – Irons

2.1.1 General

These materials are covered by IEC 60404-8-6 and IEC 60404-8-10.

2.1.1.1 Chemical composition

The basic constituent of these materials is iron, and they are often referred to as "commercially pure" or "magnetically soft" irons. Elements that adversely affect the remanence, coercivity, saturation, magnetic polarization and stability of the magnetic properties are controlled to produce the required magnetic properties for the proposed application. The amounts of the most significant elements, other than iron, when they are present in these materials are characteristically within the ranges of table 1.

Table 1 – Ranges of chemical composition

C	Si	Mn	P	S	Al	Ti	V
%	%	%	%	%	%	%	%
Up to 0,03	Up to 0,1	0,03 to 0,2	Up to 0,015*	Up to 0,03*	Up to 0,08	Up to 0,1	Up to 0,1
* For improved free machining capability, the upper limits for P and S may be higher than indicated in the table.							

2.1.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on coercivity values.

2.1.1.3 Available forms

These materials are available in a wide variety of forms. They may be supplied as slabs, billets, ingots or forgings; as hot-rolled bar in rectangular and square cross-sections; as hot-rolled wire rod in round, hexagonal and octagonal cross-sections; in cold-rolled and drawn forms as bar and wire; as hot- or cold-rolled sheet and strip.

2.1.2 Physical characteristics

In addition to the values of coercivity, a more complete definition of these materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: saturation magnetic polarization, magnetic polarization for various field strengths (from which permeability can be derived), stability of characteristics with time;
- mechanical: hardness, suitability for punching operations, free machining capability, deep drawing properties, tensile strength;
- metallurgical state: hot- or cold-worked, forged, deep drawn, fully processed state, i.e. finally annealed.

NOTE For material not delivered in the fully processed state, subclassification is based on the coercivity measured after heat treatment according to the requirements of the product standard or the recommendations of the manufacturer.

Les gammes des valeurs spécifiées des caractéristiques magnétiques mentionnées ci-dessus, à l'état fini sont comme indiquées au tableau 2.

Tableau 2 – Gammes des valeurs spécifiées des caractéristiques magnétiques

Coercitivité maximale	Polarisation magnétique minimale pour $H =$			Polarisation magnétique de saturation minimale*
	300 A/m	500 A/m	4 000 A/m	
A/m	T	T	T	T
12 à 240	1,30 à 1,15	1,40 à 1,30	1,60	2,10 à 2,16

* Valeur non spécifiée mais indicative.

2.1.3 Applications principales

Les principales applications sont dans les relais pour courant continu, les haut-parleurs, les électro-aimants, les embrayages magnétiques, les freins, les éléments de circuit magnétique d'instruments de contrôle et de mesures, les pièces polaires et pièces diverses pour moteurs et génératrices à courant continu.

2.2 Classe B – Aciers doux à faible teneur en carbone

2.2.1 Classe B.1 – Produits massifs

2.2.1.1 Généralités

Certains de ces matériaux sont couverts par la CEI 60404-8-10.

2.2.1.1.1 Composition chimique

Le constituant de base de ces matériaux est le fer contenant, en dehors des impuretés inévitables, de faibles teneurs en autres éléments qui peuvent provenir d'additions nécessaires au cours du processus de fabrication. La teneur en éléments d'alliage est limitée à celle d'un acier non allié tel que défini dans l'ISO 4948-1, en particulier la teneur en silicium est inférieure à 0,5 %.

2.2.1.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est fondée sur la coercitivité.

2.2.1.1.3 Modes de présentation

Ces matériaux sont normalement livrés sous forme de pièces moulées ou forgées dans un état final de traitement thermique ou partiellement usinées selon les plans fournis par l'utilisateur, ou sous forme de barres, fil machine ou fils laminés à chaud, laminés à froid ou étirés.

Ranges of specified values for the above-mentioned magnetic characteristics in the fully processed state are as shown in table 2.

Table 2 – Ranges of specified values for magnetic properties

Maximum coercivity	Minimum magnetic polarization for $H =$			Minimum saturation magnetic polarization*
	300 A/m	500 A/m	4 000 A/m	
A/m	T	T	T	T
12 to 240	1,30 to 1,15	1,40 to 1,30	1,60	2,10 to 2,16
* Value not specified but typical.				

2.1.3 Main applications

The main applications are in d.c. relays, loudspeakers, electromagnets, magnetic clutches, brakes, parts for magnetic circuits in instruments and control apparatus, as well as for pole pieces and other d.c. parts for generators and motors.

2.2 Class B – Low carbon mild steels

2.2.1 Class B.1 – Bulk material

2.2.1.1 General

Some of these materials are covered by IEC 60404-8-10.

2.2.1.1.1 Chemical composition

The basic constituent of these materials is iron containing unavoidable impurities, together with a low level of other elements which may arise from additions necessitated during the manufacturing process. The amount of alloying elements is limited to that of a non-alloy steel as defined in ISO 4948-1, in particular silicon is less than 0,5 %.

2.2.1.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the coercivity.

2.2.1.1.3 Available forms

These materials are normally supplied in the form of castings or forgings in a finally heat-treated condition or partially machined to drawings supplied by the user or as bar, wire rod or wire in the hot-rolled, cold-rolled or cold-drawn condition.

2.2.1.2 Caractéristiques physiques

Outre les valeurs de coercitivité, une définition plus complète de ces matériaux peut se fonder sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: polarisation magnétique pour diverses valeurs d'intensité du champ magnétique;
- mécaniques: limite apparente d'élasticité (ou limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 %), allongement ($L_0 = 5 d_0$), absence de défauts;
- état métallurgique: formé à chaud ou à froid, recuit afin d'obtenir les caractéristiques magnétiques requises.

Les essais mécaniques et les essais non destructifs sont effectués selon les normes ISO appropriées. La coercitivité est mesurée conformément à la CEI 60404-7, les autres caractéristiques magnétiques selon la CEI 60404-4.

Les gammes des valeurs types des caractéristiques mécaniques et magnétiques sont données dans le tableau 3.

Tableau 3 – Gammes des valeurs types des caractéristiques mécaniques et magnétiques

Limite apparente d'élasticité	Allongement ($L_0 = 5 d_0$)	Coercitivité	Polarisation magnétique pour $H =$		
			2 500 A/m	5 000 A/m	10 000 A/m
N/mm ²	%	A/m	T		
100 à 180	25 à 45	40 à 400	1,65 à 1,55	1,75 à 1,65	1,85 à 1,75

2.2.1.3 Applications principales

Ces matériaux sont utilisés pour de gros aimants à courant continu pour lesquels aucune résistance mécanique n'est requise par exemple aimants de déviation dans des cyclotrons et pour des applications dans les relais.

2.2.2 Classe B.2 – Produits plats

2.2.2.1 Généralités

Ces matériaux sont couverts par la CEI 60404-8-3, la CEI 60404-8-4 et la CEI 60404-8-10.

2.2.2.1.1 Composition chimique

Le constituant de base de ces matériaux est le fer contenant, en dehors des impuretés inévitables, de faibles teneurs en autres éléments qui peuvent provenir d'additions nécessaires au cours du processus de fabrication. La teneur en éléments d'alliage est limitée à celle d'un acier non allié tel que défini dans l'ISO 4948-1, en particulier la teneur en Si est inférieure à 0,5 %. Ces matériaux peuvent subir un traitement de recuit après poinçonnage afin d'accroître leurs caractéristiques magnétiques.

2.2.2.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est fondée soit sur les pertes totales spécifiques qui sont fonction de l'épaisseur et sont habituellement mesurées à une polarisation magnétique de 1,5 T et aux fréquences industrielles courantes ou (pour les applications dans les relais) sur la coercitivité.

2.2.1.2 Physical characteristics

In addition to the coercivity a more complete definition of these materials can be based on the following properties:

- magnetic: magnetic polarization at various values of magnetic field strength;
- mechanical: yield strength (or 0,2 % proof stress) elongation ($L_0 = 5 d_0$), freedom from defects;
- metallurgical state: hot- or cold-worked, annealed to produce required magnetic characteristics.

Mechanical and non-destructive tests are made in accordance with the appropriate ISO standards. Coercivity shall be measured in accordance with IEC 60404-7, other magnetic properties in accordance with IEC 60404-4.

Ranges of typical values of magnetic and mechanical properties are given in table 3.

Table 3 – Ranges of typical values of magnetic and mechanical properties

Yield strength	Elongation ($L_0 = 5 d_0$)	Coercivity	Magnetic polarization at $H =$		
			2 500 A/m	5 000 A/m	10 000 A/m
N/mm ²	%	A/m	T		
100 to 180	25 to 45	40 to 400	1,65 to 1,55	1,75 to 1,65	1,85 to 1,75

2.2.1.3 Main applications

The materials are used for large d.c. magnets where no mechanical strength is required, for example deflection magnets in elementary particle physics and for relay applications.

2.2.2 Class B.2 – Flat material

2.2.2.1 General

These materials are covered by IEC 60404-8-3, IEC 60404-8-4 and IEC 60404-8-10.

2.2.2.1.1 Chemical composition

The basic constituent of these materials is iron containing unavoidable impurities, together with a low level of other elements which may arise from additions necessitated during the manufacturing process. The amount of alloying elements is limited to that of non-alloy steel as defined in ISO 4948-1, in particular silicon is less than 0,5 %. These materials can have an annealing treatment after punching to enhance their magnetic properties.

2.2.2.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based either on the specific total loss which is a function of thickness and is normally measured at a magnetic polarization value of 1,5 T and at normal industrial power frequencies or (for relay application) on the coercivity.

2.2.2.1.3 Modes de présentation

Ces matériaux sont livrés sous la forme de tôles ou bandes laminées à froid ou (pour les applications dans les relais) sous la forme de tôles, plaques ou bandes laminées à chaud.

2.2.2.2 Caractéristiques physiques

Outre les pertes totales spécifiques, une définition plus complète de ces matériaux peut se fonder sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: polarisation magnétique pour diverses valeurs d'intensité du champ magnétique;
- mécaniques: aptitude au poinçonnage, état de surface, facteur de foisonnement;
- état métallurgique: laminé à chaud;
état dur, c'est-à-dire laminé à froid;
état semi-fini, c'est-à-dire recuit puis laminé à froid;
état fini, c'est-à-dire ayant subi le recuit final.

NOTE Pour les matériaux livrés à l'état dur ou à l'état semi-fini, la sous-classification est fondée sur les pertes totales spécifiques ou la coercitivité mesurées après le traitement thermique effectué selon les exigences de la norme de produit ou les recommandations du producteur.

- dimensions: épaisseur, largeur et (si requis) longueur.

Les épaisseurs nominales recommandées des matériaux laminés à froid sont 0,47 mm, 0,50 mm, 0,65 mm et 1,0 mm.

Les mesures magnétiques sont faites conformément à la CEI 60404-2, à la CEI 60404-3 ou à la CEI 60404-7.

Les gammes des valeurs spécifiées des pertes totales spécifiques, après recuit, pour les quatre épaisseurs couramment utilisées sont indiquées au tableau 4.

Tableau 4 – Gammes des valeurs spécifiées des pertes totales spécifiques

Epaisseur nominale	Fréquence	Gammes des pertes totales spécifiques pour $J = 1,5 \text{ T}$
mm	Hz	W/kg
0,50	50	6,6 à 10,5
0,65	50	8,0 à 12,0
0,50	60	8,4 à 13,4
0,65	60	10,2 à 15,3

La valeur maximale spécifiée de la coercitivité des matériaux pour relais est comprise entre 40 A/m et 240 A/m.

2.2.2.3 Applications principales

Les matériaux sont utilisés pour la fabrication de noyaux feuilletés destinés aux appareils électriques, et particulièrement aux petites machines et aux applications pour relais.

2.2.2.1.3 Available forms

These materials are supplied in the form of cold-rolled coils or sheets or (for relay application) in the form of hot-rolled strip, sheet or plate.

2.2.2.2 Physical characteristics

In addition to specific total loss, a more complete definition of these materials can be based on the following properties:

- magnetic: magnetic polarization at various values of field strength;
- mechanical: suitability for punching operations, surface condition, stacking factor;
- metallurgical state: hot-rolled;
hard state – i.e. cold-rolled;
semi-processed state – i.e. annealed and finally cold-rolled;
fully processed state – i.e. finally annealed.

NOTE For material delivered in the hard or semi-processed state, subclassification is based on the total specific loss or coercivity measured after heat treatment according to the requirements of the product standard or recommendations of the manufacturer.

- dimensions: thickness, width and (as required) length.

Recommended nominal thicknesses for the cold-rolled materials are 0,47 mm, 0,50 mm, 0,65 mm and 1,0 mm.

Magnetic measurements are made in accordance with IEC 60404-2, IEC 60404-3 or IEC 60404-7.

Ranges of specified specific total loss, after annealing, for the commonly used thicknesses are as shown in table 4.

Table 4 – Ranges of specified values of maximum specific total loss

Nominal thickness	Frequency	Ranges of specific total loss at $\hat{J} = 1,5 \text{ T}$
mm	Hz	W/kg
0,50	50	6,6 to 10,5
0,65	50	8,0 to 12,0
0,50	60	8,4 to 13,4
0,65	60	10,2 to 15,3

The specified maximum value of coercivity for relay material ranges from 40 A/m to 240 A/m.

2.2.2.3 Main applications

The materials are used in the manufacture of laminated cores for electrical apparatus and especially small machines and for relay applications.

2.3 Classe C – Aciers au silicium

2.3.1 Classe C.1 – Produits massifs

2.3.1.1 Généralités

Certains de ces matériaux sont couverts par la CEI 60404-8-6 et la CEI 60404-8-10.

2.3.1.1.1 Composition chimique

Le constituant de base de ces matériaux est le fer, l'élément d'alliage principal étant le silicium, dont la teneur est comprise entre 0,5 % à 5 %.

2.3.1.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est fondée sur les valeurs de la coercitivité ou de la résistivité électrique qui est fonction de la teneur en silicium.

2.3.1.1.3 Mode de présentation

Ces matériaux sont présentés sous forme de barres laminées à chaud ou étirées à froid, de fils, de barres rectifiées, de billettes à forger, et doivent être soumis à un traitement thermique après formage mécanique afin de développer les caractéristiques magnétiques requises.

2.3.1.2 Caractéristiques physiques

Outre la coercitivité et la résistivité électrique dont les intervalles sont indiquées dans le tableau 5, une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: polarisation magnétique de saturation, polarisation magnétique pour diverses valeurs d'intensité du champ magnétique, polarisation magnétique rémanente;
- mécaniques: usinabilité, ductilité, dureté;
- état métallurgique: formé à chaud ou à froid, recuit pour développer les caractéristiques magnétiques requises.

Tableau 5 – Gammes des valeurs spécifiées des caractéristiques magnétiques et électriques

Teneur en silicium*	Résistivité*	Coercitivité	Polarisation magnétique minimale pour $H =$			
			100 A/m	300 A/m	500 A/m	4 000 A/m
%	$\mu\Omega\text{m}$	A/m	T			
2 à 4,5	0,35 à 0,60	48 à 12	0,6 à 1,2	1,1 à 1,3	1,2 à 1,35	1,5

* Valeur non spécifiée mais typique.

2.3.1.3 Applications principales

Ces matériaux trouvent leurs principales applications dans les circuits magnétiques de relais, les embrayages magnétiques, les pièces polaires, les moteurs pas à pas et les enveloppes de gyroscopes.

2.3 Class C – Silicon steels

2.3.1 Class C.1 – Bulk material

2.3.1.1 General

Some of these materials are covered by IEC 60404-8-6 and IEC 60404-8-10.

2.3.1.1.1 Chemical composition

The basic constituent of these materials is iron in which the main alloying element is silicon in the range of 0,5 % to 5 %.

2.3.1.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on coercivity values or on electrical resistivity which is a function of silicon content.

2.3.1.1.3 Available forms

These materials are available as hot-rolled and cold-drawn bar, wire, ground bar and forging billets and require heat treatment after mechanical working to achieve the required magnetic properties.

2.3.1.2 Physical characteristics

In addition to the coercivity and the electrical resistivity for which ranges are given in table 5, a more complete definition of these materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: saturation magnetic polarization, magnetic polarization for various field strengths, remanent magnetic polarization;
- mechanical: machinability, ductility, hardness;
- metallurgical state: hot- or cold-worked, annealed to produce required magnetic characteristics.

Table 5 – Ranges of specified values for magnetic and electric properties

Silicon content*	Resistivity*	Coercivity	Minimum magnetic polarization at $H =$			
			100 A/m	300 A/m	500 A/m	4 000 A/m
%	$\mu\Omega\text{m}$	A/m	T			
2 to 4,5	0,35 to 0,60	48 to 12	0,6 to 1,2	1,1 to 1,3	1,2 to 1,35	1,5
* Value not specified but typical.						

2.3.1.3 Main applications

The main applications are for the magnetic circuits of relays, magnetic clutches, magnetic pole pieces, stepping motors and gyro housings.

2.3.2 Classe C.2 – Produits plats

2.3.2.1 Classe C.21 – Aciers isotropes* (non orientés) pour utilisation aux fréquences industrielles

2.3.2.1.1 Généralités

Ces matériaux sont couverts par la CEI 60404-8-2, la CEI 60404-8-4, la CEI 60404-8-6 et la CEI 60404-8-10.

2.3.2.1.1.1 Composition chimique

Le constituant de base de ces matériaux est le fer. L'élément d'alliage principal est le silicium, dont la teneur peut être comprise entre 0,5 % et 5 %. D'autres éléments d'alliage, par exemple l'aluminium, peuvent aussi être présents. Le matériau contient également des impuretés inévitables et de faibles teneurs en d'autres éléments qui proviennent des additions nécessitées par le procédé de fabrication.

2.3.2.1.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est fondée sur les pertes totales spécifiques qui sont fonction de l'épaisseur et qui sont normalement mesurées à des valeurs de polarisation magnétique de 1,5 T et aux fréquences industrielles.

Quand l'application le requiert (par exemple pour les relais) il peut être plus approprié de fonder la sous-classification sur la coercitivité ou la perméabilité.

2.3.2.1.1.3 Modes de présentation

Ces matériaux sont généralement présentés sous forme de bandes ou de tôles laminées à froid.

2.3.2.1.2 Caractéristiques physiques

Outre les valeurs de pertes totales spécifiques, une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: polarisation magnétique pour différentes valeurs d'intensité du champ magnétique, puissance apparente spécifique pour différentes valeurs de la polarisation magnétique, anisotropie des pertes;
- électriques: type de l'isolation de la surface et sa résistance, résistivité;
- mécaniques: aptitude au poinçonnage, ductilité, résistance à la traction, dureté, état de surface et finition, facteur de foisonnement, planéité, rectitude des rives;
- état métallurgique: état dur, c'est-à-dire laminé à froid;
état semi-fini, c'est-à-dire recuit ou recuit et laminé à tiède;
état fini, c'est-à-dire recuit final.

NOTE Pour les matériaux livrés en état dur ou à l'état semi-fini, la sous-classification est fondée sur les pertes totales spécifiques mesurées après traitement thermique effectué selon les exigences de la norme de produit ou selon les recommandations du fabricant.

- dimensions: épaisseur, largeur et (si requis) longueur.

Les valeurs normalement recommandées pour l'épaisseur nominale sont 0,35 mm, 0,47 mm, 0,50 mm, 0,65 mm et 1,00 mm.

* Il s'agit d'un matériau pratiquement isotrope et élaboré spécialement pour obtenir cette caractéristique.

2.3.2 Class C.2 – Flat material

2.3.2.1 Class C.21 – Isotropic* (non-oriented) steels for use at power frequencies

2.3.2.1.1 General

These materials are covered by IEC 60404-8-2, IEC 60404-8-4, IEC 60404-8-6 and IEC 60404-8-10.

2.3.2.1.1.1 Chemical composition

The basic constituent of these materials is iron. The main alloying element is silicon, whose content may be between 0,5 % and 5 %. Other alloying elements, for example aluminium, may also be present. The material also contains unavoidable impurities, together with a low level of other elements which may arise from additions necessitated during the manufacturing process.

2.3.2.1.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the specific total loss which is a function of thickness and normally measured at a magnetic polarization value of 1,5 T and at power frequencies.

When the application demands it (for example relays), it may be more appropriate for the subclassification to be based on coercivity or permeability.

2.3.2.1.1.3 Available forms

These materials are normally supplied in the form of cold-rolled coils or sheets.

2.3.2.1.2 Physical characteristics

In addition to the values of specific total loss, a more complete definition of these materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: magnetic polarization for various values of magnetic field strength, specific apparent power for different values of magnetic polarization anisotropy of loss;
- electrical: type of surface insulation and its resistance, resistivity;
- mechanical: suitability for punching operations, ductility, tensile strength, hardness, surface condition and finish, stacking factor, flatness, edge camber;
- metallurgical state: hard state, i.e. as cold rolled;
semi-processed state, i.e. annealed or annealed and temper rolled;
fully-processed state, i.e. finally annealed;

NOTE For material delivered in the hard or semi-processed state, the subclassification is based on the specific total losses measured after heat treatment according to the requirements of the product standard or the recommendations of the manufacturer.

- dimensions: thickness, width and (as required) length.

The values of nominal thickness normally recommended are 0,35 mm, 0,47 mm, 0,50 mm, 0,65 mm and 1,00 mm.

* This describes a material which is substantially isotropic and deliberately processed to be so.

Les mesures magnétiques doivent être faites conformément à la CEI 60404-2 ou à la CEI 60404-3. Pour la masse volumique, il convient de retenir, pour les mesures magnétiques, les valeurs définies dans la norme produit correspondante. Dans les autres cas, il convient que les valeurs de la masse volumique fassent l'objet d'un accord.

Les gammes de valeurs spécifiées des pertes totales spécifiques après recuit final, pour quatre épaisseurs courantes, sont indiquées dans le tableau 6.

Tableau 6 – Gammes des valeurs spécifiées des pertes totales spécifiques

Epaisseur nominale	Fréquence	Gammes des pertes totales spécifiques pour $J = 1,5 \text{ T}$
mm	Hz	W/kg
0,35	50	2,3 à 3,6
0,50	50	2,5 à 10
0,65	50	3,1 à 10
1,00	50	6,0 à 13
0,35	60	2,9 à 4,6
0,50	60	3,2 à 11,9
0,65	60	4,1 à 12,8
1,00	60	8,1 à 17,3

2.3.2.1.3 Applications principales

Ces matériaux sont principalement employés pour la confection des circuits magnétiques d'appareils électriques, en particulier pour les éléments de machines tournantes dans lesquels le flux n'est pas unidirectionnel. Ils peuvent être aussi employés pour la construction de relais électromagnétiques, de petits transformateurs, starters de tubes fluorescents, de compteurs électriques, écrans et pôles magnétiques de synchrotrons à électrons et à protons.

2.3.2.2 Classe C.22 – Aciers anisotropes* (à grains orientés) pour utilisation à des fréquences industrielles

2.3.2.2.1 Généralités

Ces matériaux sont couverts par la CEI 60404-8-7.

2.3.2.2.1.1 Composition chimique

Le constituant de base de ces matériaux est le fer et l'élément d'alliage principal est le silicium (environ 3 %), avec des impuretés inévitables et de faibles teneurs d'autres éléments provenant des additions nécessitées par le procédé de fabrication. Ce type de matériau magnétique possède des caractéristiques anisotropes (orientation cristalline) et présente, suivant une direction parallèle à l'axe de laminage, les plus faibles valeurs de pertes spécifiques et les plus hautes valeurs de perméabilité. Ces propriétés sont affectées par les traitements mécaniques et un recuit de relaxation peut permettre d'atteindre les valeurs optimales de ces caractéristiques.

* Il s'agit d'un matériau pratiquement anisotrope et élaboré spécialement pour obtenir cette caractéristique.

Magnetic measurements are made in accordance with IEC 60404-2 or IEC 60404-3. The density values to be used for magnetic measurements should be as defined in the relevant product standard. In other cases, the density values should be the subject of agreement.

Ranges of specified values of specific total loss, after final annealing, for four commonly used thicknesses are shown in table 6.

Table 6 – Ranges of specified values of maximum specific total loss

Nominal thickness	Frequency	Ranges of specific total loss at $\hat{J} = 1,5 \text{ T}$
mm	Hz	W/kg
0,35	50	2,3 to 3,6
0,50	50	2,5 to 10
0,65	50	3,1 to 10
1,00	50	6,0 to 13
0,35	60	2,9 to 4,6
0,50	60	3,2 to 11,9
0,65	60	4,1 to 12,8
1,00	60	8,1 to 17,3

2.3.2.1.3 Main application

These materials are used mainly in the magnetic circuits of electrical apparatus, particularly in the parts of rotating machines in which the flux is not unidirectional. They may also be used in electromagnetic relays, small transformers, chokes for fluorescent tubes, electrical meters, shielding and magnetic poles of electron and proton synchrotrons.

2.3.2.2 Class C.22 – Anisotropic* (oriented) steels for use at power frequencies

2.3.2.2.1 General

These materials are covered by IEC 60404-8-7.

2.3.2.2.1.1 Chemical composition

The basic constituent of these materials is iron and the main alloying element is silicon (approximately 3 %), together with unavoidable impurities and low levels of other elements which may arise from additions necessitated during the manufacturing process. This type of magnetic material possesses anisotropic properties (orientation) such that the direction parallel to the axis of rolling shows the lowest values of specific total losses and the highest permeability. These properties are sensitive to mechanical treatment, and stress relief annealing may be used to optimize the inherent properties.

* This describes a material which is substantially anisotropic and deliberately processed to be so.

2.3.2.2.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est fondée sur la perfection de l'orientation cristalline exprimée par la polarisation magnétique pour une intensité de champ magnétique de 800 A/m et sur les pertes totales spécifiques qui sont fonction de l'épaisseur et de l'orientation et qui sont normalement mesurées aux valeurs de la polarisation magnétique de 1,5 T ou 1,7 T et aux fréquences industrielles.

2.3.2.2.1.3 Modes de présentation

Ces matériaux sont généralement présentés sous forme de bandes ou de tôles laminées à froid ayant un revêtement isolant inorganique.

2.3.2.2.2 Caractéristiques physiques

Outre la perfection de l'orientation cristalline et les pertes totales spécifiques, une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- électriques: type de l'isolation de la surface et sa résistance, résistivité;
- mécaniques: ductilité, état de surface, facteur de foisonnement, planéité, rectitude des rives;
- état métallurgique: recuit et entièrement recristallisé;
- dimensions: épaisseur, largeur et (si requis) longueur.

Les valeurs d'épaisseur nominale normalement utilisées sont: 0,23 mm, 0,27 mm, 0,30 mm et 0,35 mm. Si d'autres épaisseurs sont requises, les valeurs 0,18 mm et 0,50 mm sont recommandées.

Les mesures magnétiques doivent être faites conformément à la CEI 60404-2 ou à la CEI 60404-3. La valeur de la masse volumique à retenir pour les calculs est normalement 7,65 kg/dm³ et les éprouvettes doivent être prélevées parallèlement à l'axe de laminage et soumises, avant mesure, à un recuit de relaxation suivant les recommandations du fabricant.

Les gammes de valeurs spécifiées des pertes totales spécifiques après recuit de relaxation, pour les épaisseurs utilisées couramment, figurent dans le tableau 7.

Tableau 7 – Gammes des valeurs spécifiées des pertes totales spécifiques maximales

Épaisseur nominale	Matériau normal		Matériau à haute perméabilité	
	Pertes totales spécifiques maximales à			
	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
	$\hat{J} = 1,7 \text{ T}$		$\hat{J} = 1,7 \text{ T}$	
	mm	W/kg	W/kg	W/kg
0,23	1,20 à 1,27	1,57 à 1,65	0,90 à 1,00	1,21 à 1,32
0,27	1,30 à 1,40	1,68 à 1,85	1,03 à 1,10	1,35 à 1,45
0,30	1,40 à 1,50	1,83 à 1,98	1,05 à 1,17	1,38 à 1,54
0,35	1,50 à 1,65	1,98 à 2,18	1,25 à 1,35	1,64 à 1,77

De plus, les matériaux non encore spécifiés dans la CEI 60404-8-7 sont disponibles avec les caractéristiques données dans le tableau 8.

2.3.2.2.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the perfection of crystal orientation expressed by the magnetic polarization for a magnetic field strength of 800 A/m and on the specific total loss, which is a function of thickness and of the orientation, and is normally measured at magnetic polarization values of 1,5 T or 1,7 T and at power frequencies.

2.3.2.2.1.3 Available forms

These materials are normally supplied in the form of cold-rolled coils or sheets having an inorganic insulating coating.

2.3.2.2.2 Physical characteristics

In addition to the perfection of crystal orientation and to the values of specific total loss, a more complete definition of these materials can be based on the following characteristics:

- electrical: type of surface insulation and its resistance, resistivity;
- mechanical: ductility, surface condition and finish, stacking factor, flatness, edge camber;
- metallurgical state: annealed and fully recrystallized;
- dimensions: thickness, width and (if required) length.

The values of nominal thickness normally used are: 0,23 mm, 0,27 mm, 0,30 mm and 0,35 mm. If other thicknesses are required, the values 0,18 mm and 0,50 mm are recommended.

Magnetic measurements are made in accordance with IEC 60404-2 or IEC 60404-3. The density used for calculations is normally 7,65 kg/dm³ and test pieces are taken parallel to the axis of rolling and, before measurement, undergo stress relief annealing in accordance with the recommendations of the manufacturer.

Ranges of specified values of maximum specific total loss, after stress relief annealing, for the normally used thicknesses are shown in table 7.

Table 7 – Ranges of specified values of maximum specific total loss

Nominal thickness	Regular material		Material with high permeability	
	Maximum specific total loss at			
	50 Hz	60 Hz	50 Hz	60 Hz
	$\hat{J} = 1,7 \text{ T}$		$\hat{J} = 1,7 \text{ T}$	
mm	W/kg	W/kg	W/kg	W/kg
0,23	1,20 to 1,27	1,57 to 1,65	0,90 to 1,00	1,21 to 1,32
0,27	1,30 to 1,40	1,68 to 1,85	1,03 to 1,10	1,35 to 1,45
0,30	1,40 to 1,50	1,83 to 1,98	1,05 to 1,17	1,38 to 1,54
0,35	1,50 to 1,65	1,98 to 2,18	1,25 to 1,35	1,64 to 1,77

In addition, materials which are not yet specified in IEC 60404-8-7 are available, with the properties given in table 8.

Tableau 8 – Gammas des valeurs types des pertes totales spécifiques maximales

Epaisseur nominale	Matériau à domaine affiné	
	Pertes totales spécifiques maximales à $\hat{J} = 1,7 \text{ T}$	
	50 Hz	60 Hz
mm	W/kg	
0,23	0,80 à 0,90	1,06 à 1,21
0,27	0,85 à 0,95	1,12 à 1,25

2.3.2.2.3 Applications principales

Ces matériaux sont principalement utilisés pour la confection de circuits magnétiques dans lesquels le flux circule essentiellement parallèlement à la direction de laminage à froid comme dans les noyaux de transformateurs.

2.3.2.3 Classe C.23 – Tôles minces d'acier au silicium**2.3.2.3.1 Généralités**

Ces matériaux sont couverts par la CEI 60404-8-8.

2.3.2.3.1.1 Composition chimique

Le constituant de base de ces matériaux est le fer. L'élément d'alliage principal est le silicium, dans une teneur comprise entre 2 % et 4 %. D'autres éléments d'alliage, notamment l'aluminium, peuvent aussi être présents. Outre les impuretés inévitables, ces matériaux contiennent de faibles proportions d'autres éléments qui peuvent provenir des additions nécessitées par le procédé de fabrication.

2.3.2.3.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est fondée sur l'anisotropie magnétique et sur les pertes totales spécifiques qui sont fonction de l'épaisseur, de la polarisation magnétique et de la fréquence d'essai.

2.3.2.3.1.3 Modes de présentation

Ces matériaux sont normalement présentés sous forme de bandes ou tôles laminées à froid.

2.3.2.3.2 Caractéristiques physiques

Outre les valeurs des pertes totales spécifiques, une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: polarisation magnétique pour différentes valeurs d'intensité du champ magnétique;
- électriques: types de l'isolation de surface et sa résistance, résistivité;
- mécaniques: ductilité, facteur de foisonnement, planéité, rectitude des rives;
- état métallurgique: recuit et entièrement recristallisé;
- dimensions: épaisseur, largeur et (si requis) longueur.

Table 8 – Ranges of typical values of maximum specific loss

Nominal thickness	Domain-refined material	
	Maximum specific total loss at $J = 1,7 \text{ T}$	
	50 Hz	60 Hz
mm	W/kg	
0,23	0,80 to 0,90	1,06 to 1,21
0,27	0,85 to 0,95	1,12 to 1,25

2.3.2.2.3 Main applications

These materials are used mainly for the manufacture of magnetic cores in which the magnetic flux paths are substantially parallel to the direction of cold-rolling, as for example in transformer cores.

2.3.2.3 Class C.23 – Thin silicon steels**2.3.2.3.1 General**

These materials are covered by IEC 60404-8-8.

2.3.2.3.1.1 Chemical composition

The basic constituent of these materials is iron. The main alloying element is silicon, whose content may be between 2 % and 4 %. Other alloying elements, namely aluminium, may also be present. The material also contains unavoidable impurities, together with a low level of other elements which may arise from additions necessitated during the manufacturing process.

2.3.2.3.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the magnetic anisotropy and the specific total loss which is a function of thickness, magnetic polarization value and test frequency.

2.3.2.3.1.3 Available forms

These materials are normally supplied in the form of cold-rolled coils or sheets.

2.3.2.3.2 Physical characteristics

In addition to the values of specific total loss, a more complete definition of these materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: magnetic polarization for different values of the magnetic field strength;
- electrical: type of surface insulation and its resistance, resistivity;
- mechanical: ductility, stacking factor, flatness, edge camber;
- metallurgical state: annealed and fully recrystallized;
- dimensions: thickness, width and (if required) length.

Les valeurs spécifiées des pertes totales spécifiques maximales des épaisseurs couramment utilisées sont indiquées dans le tableau 9.

Tableau 9 – Valeurs spécifiées des pertes totales spécifiques maximales

Type	Epaisseur nominale	Pertes totales spécifiques maximales pour $\hat{J} =$		Fréquence
		1 T	1,5 T	
	mm	W/kg		Hz
A grains orientés	0,05	24	–	1 000
	0,1	–	15	400
	0,15	–	16	400
A grains non orientés	0,05	45	–	1 000
	0,1	13	–	400
	0,15	14	–	400
	0,2	15	–	400

Les caractéristiques magnétiques sont déterminées conformément à la CEI 60404-10 et, à l'exclusion des matériaux à grains non orientés de 0,2 mm d'épaisseur, sur des éprouvettes qui ont été recuites selon les recommandations du fabricant.

2.3.2.3.3 Applications principales

Ces matériaux sont principalement utilisés pour la confection de circuits magnétiques de transformateurs et de machines tournantes fonctionnant à des fréquences supérieures à 100 Hz.

2.3.2.4 Classe C.24 – Aciers avec des caractéristiques mécaniques et pertes totales spécifiques spécifiées

2.3.2.4.1 Généralités

Ces matériaux ne sont pas couverts par une publication CEI.

2.3.2.4.1.1 Composition chimique

Le constituant de base de ces matériaux est le fer. L'élément d'alliage principal est le silicium, dans une teneur comprise entre 2 % et 5 %. D'autres éléments d'alliage tels que l'aluminium, le manganèse, peuvent aussi être ajoutés afin d'accroître la résistance et d'améliorer les caractéristiques magnétiques. Ces matériaux contiennent des impuretés inévitables ainsi que de faibles proportions d'autres éléments provenant des additions nécessitées par le procédé de fabrication.

2.3.2.4.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est fondée sur la limite apparente d'élasticité.

2.3.2.4.1.3 Modes de présentation

Ces matériaux sont normalement livrés sous forme de bandes ou tôles laminées à froid et ayant subi un recuit final.

The specified values of maximum specific total loss for the commonly used thicknesses are shown in table 9.

Table 9 – Specified values of maximum specific total loss

Type	Nominal thickness	Maximum specific total loss at $\hat{J} =$		Frequency
		1 T	1,5 T	
	mm	W/kg		Hz
Grain-oriented	0,05	24	–	1 000
	0,1	–	15	400
	0,15	–	16	400
Non-oriented	0,05	45	–	1 000
	0,1	13	–	400
	0,15	14	–	400
	0,2	15	–	400

The magnetic properties are determined in accordance with IEC 60404-10 and, except for the non-oriented material of 0,2 mm thickness, on test specimens which have been annealed in accordance with the recommendations of the manufacturer.

2.3.2.3.3 Main applications

These materials are mainly used in magnetic circuits of transformers and rotating machines operating at frequencies above 100 Hz.

2.3.2.4 Class C.24 – Steels with specified mechanical properties and specific total loss

2.3.2.4.1 General

These materials are not covered by an IEC publication.

2.3.2.4.1.1 Chemical composition

The basic constituent of these materials is iron. The main alloying element is silicon whose content may be between 2 % and 5 %. Other alloying elements, such as aluminium, manganese, may be added to increase strength and improve magnetic properties. The material also contains unavoidable impurities, together with a low level of other elements which may arise from additions necessitated during the manufacturing process.

2.3.2.4.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the yield strength.

2.3.2.4.1.3 Available forms

These materials are normally supplied in the form of cold-rolled and finally annealed coils or sheet.

2.3.2.4.2 Caractéristiques physiques

Outre la limite apparente d'élasticité, une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: pertes totales spécifiques, polarisation magnétique pour différentes valeurs d'intensité du champ magnétique;
- électriques: isolation de la surface et sa résistance, résistivité;
- mécaniques: résistance à la traction, allongement, dureté, facteur de foisonnement;
- état métallurgique: état fini, c'est-à-dire ayant subi un recuit final;
- dimensions: épaisseur, largeur et (si requis) longueur.

Les valeurs types des caractéristiques mécaniques et magnétiques pour l'épaisseur de 0,50 mm sont données dans le tableau 10.

Tableau 10 – Valeurs types des caractéristiques mécaniques et magnétiques pour l'épaisseur de 0,50 mm

Limite apparente d'élasticité (L)	Pertes totales spécifiques pour $j = 1,5 \text{ T}$ et $f = 50 \text{ Hz}$ (L + C)	Polarisation magnétique pour $H = 5 \text{ kA/m}$ (L + C)	Facteur de foisonnement
N/mm ²	W/kg	T	%
470	4,6	1,69	98,0
620	6,7	1,63	98,0
NOTE L = parallèle à la direction de laminage; C = perpendiculaire à la direction de laminage.			

2.3.2.4.3 Applications principales

Ces matériaux sont généralement utilisés dans des conditions de flux alternés pour des parties sous contrainte de circuits magnétiques tels que les rotors de machines électriques tournantes à grande vitesse.

2.3.2.5 Classe C.25 – Aciers à 6,5 % de silicium

2.3.2.5.1 Généralités

Ces matériaux ne sont pas couverts par une publication CEI.

2.3.2.5.1.1 Composition chimique

Le constituant de base de ces matériaux est le fer. L'élément d'alliage principal est le silicium, dans une teneur comprise entre 6 % et 7 %. D'autres éléments d'alliage peuvent être également présents. Ce matériau contient également des impuretés inévitables ainsi que de faibles proportions d'autres éléments pouvant provenir des additions nécessitées par le procédé de fabrication.

2.3.2.5.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est basée sur les pertes totales spécifiques qui sont fonction de l'épaisseur, de la polarisation magnétique et de la fréquence d'essai.

2.3.2.4.2 Physical characteristics

In addition to the yield strength, a more complete definition of these materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: specific total loss, magnetic polarization for different values of the magnetic field strength;
- electrical: surface insulation and its resistance, resistivity;
- mechanical: tensile strength, elongation, hardness, stacking factor;
- metallurgical state: fully processed, i.e. finally annealed;
- dimensions: thickness, width and (if required) length.

Typical values of mechanical and magnetic properties for the thickness of 0,50 mm are given in table 10.

Table 10 – Typical values of mechanical and magnetic properties for the thickness of 0,50 mm

Yield strength (L)	Specific total loss at $\hat{J} = 1,5 \text{ T}$ and $f = 50 \text{ Hz}$ (L + C)	Magnetic polarization at $H = 5 \text{ kA/m}$ (L + C)	Stacking factor
N/mm ²	W/kg	T	%
470	4,6	1,69	98,0
620	6,7	1,63	98,0
NOTE L = parallel to rolling direction; C = perpendicular to rolling direction.			

2.3.2.4.3 Main applications

These materials are generally used under conditions of alternating flux for the stressed parts of magnetic circuits such as rotors of high-speed rotating electric machines.

2.3.2.5 Class C.25 – 6,5 % silicon steels

2.3.2.5.1 General

These materials are not covered by an IEC publication.

2.3.2.5.1.1 Chemical composition

The basic constituent of these materials is iron. The main alloying element is silicon whose content may be between 6 % and 7 %. Other alloying elements may also be present. The material also contains unavoidable impurities, together with a low level of other elements which may arise from additions necessitated during the manufacturing process.

2.3.2.5.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the specific total loss which is a function of thickness, magnetic polarization value and test frequency.

2.3.2.5.1.3 Modes de présentation

Ces matériaux sont normalement présentés sous forme de bandes ou de tôles laminées à froid.

2.3.2.5.2 Caractéristiques physiques

Outre les valeurs des pertes totales spécifiques, une définition plus complète peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: polarisation magnétique pour différentes valeurs d'intensité du champ magnétique;
- électriques: type de revêtement isolant et sa résistance, résistivité;
- mécaniques: facteur de foisonnement, planéité, rectitude des rives ;
- état métallurgique: état fini, c'est-à-dire ayant subi un recuit final;
- dimensions: épaisseur, largeur et (si requis) longueur.

Les valeurs types des caractéristiques magnétiques sont données dans le tableau 11.

Tableau 11 – Valeurs types des caractéristiques magnétiques

Epaisseur nominale	Pertes totales spécifiques maximales à $\hat{J} = 1,0 \text{ T}$		Magnétostriction (crête à crête) à 1,0 T et 400 Hz
	W/kg	Hz	$\times 10^{-7}$
mm			
0,05	20,0	1 000	1,2
0,10	6,0	400	1,2
0,20	8,0	400	1,2
0,30	10,0	400	1,2

Les pertes totales spécifiques sont déterminées conformément à la CEI 60404-10, en utilisant des échantillons cisailés composés pour moitié de bandes prélevées parallèlement à la direction de laminage et pour l'autre moitié de bandes prélevées perpendiculairement.

La magnétostriction est mesurée à $\hat{J} = 1,0 \text{ T}$ et $f = 400 \text{ Hz}$ en utilisant un mesureur de déplacement à fibres optiques.

2.3.2.5.3 Applications principales

Ces matériaux sont généralement utilisés dans des circuits magnétiques d'appareils électriques opérant à des fréquences supérieures à 100 Hz, et qui exigent une sortie à faible bruit et une faible perte à cœur à fréquence plus élevée, tels que les transformateurs à haute fréquence, les réacteurs et moteurs d'appareils électriques portables.

2.4 Classe D – Autres types d'aciers

2.4.1 Classe D.1 – Produits massifs

2.4.1.1 Classe D.11 – Aciers moulés

2.4.1.1.1 Généralités

Ces matériaux ne sont pas couverts par une publication CEI.

2.3.2.5.1.3 Available forms

These materials are normally supplied in the form of cold-rolled coils or sheets.

2.3.2.5.2 Physical characteristics

In addition to the values of specific total loss, a more complete definition of these materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: magnetic polarization for different values of the magnetic field strength;
- electrical: type of surface insulation and its resistance, resistivity;
- mechanical: stacking factor, flatness, edge camber;
- metallurgical state: fully processed, i.e. finally annealed;
- dimensions: thickness, width and (if required) length.

Typical values of magnetic properties are given in table 11.

Table 11 – Typical values of magnetic properties

Nominal thickness	Maximum specific total loss at $\hat{J} = 1,0 \text{ T}$		Magnetostriction (peak to peak) at 1,0 T and 400 Hz
	W/kg	Hz	$\times 10^{-7}$
0,05	20,0	1 000	1,2
0,10	6,0	400	1,2
0,20	8,0	400	1,2
0,30	10,0	400	1,2

Specific total loss is determined in accordance with IEC 60404-10, using sheared specimens consisting of half the strip taken parallel and half taken perpendicular to the axis of rolling.

Magnetostriction is measured at $\hat{J} = 1,0 \text{ T}$ and $f = 400 \text{ Hz}$, using an optical fibre displacement meter.

2.3.2.5.3 Main applications

These materials are generally used in magnetic circuits of the electrical apparatus operating at frequencies above 100 Hz, which require low noise output and low core loss at higher frequency, such as high-frequency transformers, reactors and the motors used in portable electrical apparatus.

2.4 Class D – Other steels

2.4.1 Class D.1 – Bulk material

2.4.1.1 Class D.11 – Cast solid steels

2.4.1.1.1 General

These materials are not covered by an IEC publication.

2.4.1.1.1 Composition chimique

Le constituant de base de ces matériaux est le fer, contenant des impuretés inévitables. L'élément d'alliage principal est le carbone, dans une teneur inférieure à 0,45 % et d'autres éléments (tels que chrome, nickel, manganèse, molybdène, et silicium) peuvent aussi être nécessaires pour atteindre les caractéristiques requises.

2.4.1.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est fondée sur la limite apparente d'élasticité ou la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % qui sont fonction de la composition chimique et des traitements thermiques.

2.4.1.1.3 Modes de présentation

Ces matériaux sont normalement présentés sous forme de pièces moulées ayant reçu le traitement thermique final ou sous forme de pièces partiellement usinées suivant les plans de l'utilisateur.

2.4.1.1.2 Caractéristiques physiques

Outre les valeurs de la limite apparente d'élasticité, une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: polarisation magnétique pour différentes valeurs d'intensité du champ magnétique, coercitivité;
- électriques: résistivité;
- mécaniques: résistance à la traction, allongement, énergie de rupture en flexion par choc, absence de défauts;
- état métallurgique: soit normalisé et revenu, soit trempé et revenu.

Les essais mécaniques et les essais non destructifs sont exécutés conformément aux normes ISO appropriées. La coercitivité est mesurée conformément à la CEI 60404-7, les autres caractéristiques magnétiques conformément à la CEI 60404-4.

Les gammes types des valeurs des caractéristiques mécaniques et magnétiques sont données dans le tableau 12.

Tableau 12 – Gammes types des caractéristiques mécaniques et magnétiques

Limite apparente d'élasticité	Résistance à la traction	Allongement $L_o = 5,65\sqrt{S_o}$	Energie de rupture en flexion par choc	Polarisation magnétique pour $\hat{H} =$		
				2 500 A/m	5 000 A/m	10 000 A/m
N/mm ²	N/mm ²	%	J	T		
200 à 500	350 à 700	25 à 12	50 à 20	1,50 à 1,30	1,65 à 1,50	1,80 à 1,65

2.4.1.1.3 Applications principales

Ces matériaux sont utilisés pour la construction de circuits magnétiques d'appareils électriques lorsqu'une certaine résistance mécanique est requise, en particulier les éléments de machines tournantes, tels que les rotors, pièces polaires, plaques de pression, culasses d'aimants.

2.4.1.1.1.1 Chemical composition

The basic constituent of these materials is iron containing unavoidable impurities. The main alloying elements are carbon, whose content is lower than 0,45 %, and other elements (namely chromium, nickel, manganese, molybdenum and silicon) which may be necessary to develop the required properties.

2.4.1.1.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the yield strength or 0,2 % proof stress, which are a function of chemical composition and heat treatment.

2.4.1.1.1.3 Available forms

These materials are usually supplied in the form of castings in a finally heat-treated condition or partially machined to drawings supplied by the user.

2.4.1.1.2 Physical characteristics

In addition to the values of yield strength, a more complete definition of the material may be based on the following characteristics:

- magnetic: magnetic polarization at various values of magnetic field strength, coercivity;
- electrical: resistivity;
- mechanical: tensile strength, elongation, impact properties, freedom from defects;
- metallurgical state: either normalized and tempered or quenched and tempered.

Mechanical and non-destructive tests are made in accordance with the appropriate ISO standards. Coercivity is measured in accordance with IEC 60404-7, other magnetic properties in accordance with IEC 60404-4.

Typical ranges of magnetic and mechanical properties are given in table 12.

Table 12 – Typical ranges of magnetic and mechanical properties

Yield strength	Tensile strength	Elongation $L_0 = 5,65 \sqrt{S_0}$	Impact values	Magnetic polarization at $\hat{H} =$		
				2 500 A/m	5 000 A/m	10 000 A/m
N/mm ²	N/mm ²	%	J	T		
200 to 500	350 to 700	25 to 12	50 to 20	1,50 to 1,30	1,65 to 1,50	1,80 to 1,65

2.4.1.1.3 Main applications

The materials are used in the magnetic circuits of electrical apparatus, where a certain mechanical strength is required, particularly in parts of rotating machinery such as rotors, pole pieces, pressure plates and magnet frames.

2.4.1.2 Classe D.12 – Pièces forgées

2.4.1.2.1 Généralités

Ces matériaux ne sont pas couverts par une publication CEI.

2.4.1.2.1.1 Composition chimique

Le constituant de base de ces matériaux est le fer. Les éléments d'alliage principaux sont le carbone, dans une teneur qui peut être comprise entre 0,15 % et 0,5 % et suivant les caractéristiques mécaniques requises et les dimensions des pièces forgées, d'autres éléments d'alliage tels que nickel (jusqu'à 4 %), chrome (jusqu'à 1,8 %), molybdène (jusqu'à 0,50 %), vanadium (jusqu'à 0,12 %) et manganèse (jusqu'à 1,9 %). Le matériau contient aussi des impuretés inévitables ainsi que de faibles proportions d'autres éléments (Si, Al) qui peuvent provenir d'additions nécessitées par le procédé de fabrication.

2.4.1.2.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est fondée sur la limite apparente d'élasticité ou sur la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % qui sont normalement fonction de la composition chimique et des traitements thermiques.

2.4.1.2.1.3 Modes de présentation

Ces matériaux sont normalement présentés sous forme de pièces forgées ayant reçu le traitement thermique final ou sous forme de pièces partiellement usinées suivant les plans de l'utilisateur.

2.4.1.2.2 Caractéristiques physiques

Outre les valeurs de la limite apparente d'élasticité, une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: polarisation magnétique pour différentes valeurs d'intensité du champ magnétique;
- électriques: résistivité;
- mécaniques: résistance à la traction, allongement, énergie de rupture en flexion par choc, aptitude au pliage, absence de défauts;
- état métallurgique: soit normalisé et revenu, soit trempé et revenu;
- dimensions: suivant les plans de l'utilisateur.

Les essais mécaniques et les essais non destructifs sont exécutés conformément aux normes ISO appropriées. Les caractéristiques magnétiques sont mesurées conformément à la CEI 60404-4.

Les gammes types des caractéristiques mécaniques sont données dans le tableau 13.

Tableau 13 – Gammes types des caractéristiques mécaniques

Limite apparente d'élasticité	Résistance à la traction	Allongement $L_o = 5,65 \sqrt{S_o}$	Energie de rupture en flexion par choc sur éprouvette avec entaille en V
N/mm ²	N/mm ²	%	J
200 à 800	300 à 1 000	20 à 12	136 à 16

2.4.1.2 Class D.12 – Forged solid steel

2.4.1.2.1 General

These materials are not covered by an IEC publication.

2.4.1.2.1.1 Chemical composition

The basic constituent of these materials is iron. The main alloying elements are carbon whose content may vary from 0,15 % to 0,5 % and other alloying elements such as nickel (up to 4 %), chromium (up to 1,8 %), molybdenum (up to 0,5 %), vanadium (up to 0,12 %) and manganese (up to 1,9 %), depending on the mechanical properties required and the size of the forgings. The material also contains unavoidable impurities together with a low content of other elements (Si, Al) which may arise from additions necessitated during the manufacturing process.

2.4.1.2.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the yield strength or 0,2 % proof stress which are normally a function of chemical composition and heat treatment.

2.4.1.2.1.3 Available forms

The materials are usually supplied in the form of forgings in a finally heat-treated and partially machined condition to drawings supplied by the user.

2.4.1.2.2 Physical characteristics

In addition to the values of yield strength, a more complete definition of these materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: magnetic polarization at various values of magnetic field strength;
- electrical: resistivity;
- mechanical: tensile strength, elongation, impact properties, bend test, freedom from defects;
- metallurgical state: either normalized and tempered or quenched and tempered;
- dimensions: according to drawings supplied by the user.

Mechanical and non-destructive tests are made in accordance with the appropriate ISO standards. Magnetic properties are measured in accordance with IEC 60404-4.

Typical ranges of mechanical properties are given in table 13.

Table 13 – Typical ranges of mechanical properties

Yield strength	Tensile strength	Elongation $L_o = 5,65\sqrt{S_o}$	Impact values V-notch test
N/mm ²	N/mm ²	%	J
200 to 800	300 to 1 000	20 to 12	136 to 16

2.4.1.2.3 Applications principales

Ces matériaux sont utilisés pour la construction de circuits magnétiques d'appareils électriques, particulièrement dans les parties des machines tournantes soumises à des sollicitations mécaniques telles que les arbres de machines tournantes, épanouissements polaires, noyaux polaires et plaques d'extrémité.

2.4.2 Classe D.2 – Produits plats

2.4.2.1 Classe D. 21 – Aciers à haute résistance – Aciers avec caractéristiques mécaniques et perméabilité spécifiées

2.4.2.1.1 Généralités

Ces matériaux sont couverts par la CEI 60404-8-5.

2.4.2.1.1.1 Composition chimique

Le constituant de base de ces matériaux est le fer. Les éléments d'alliage sont le carbone et d'autres éléments par exemple le silicium. Ce matériau contient également des impuretés inévitables et de faibles proportions d'autres éléments qui peuvent provenir des additions nécessitées par le procédé de fabrication.

2.4.2.1.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est fondée sur la limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 %.

2.4.2.1.1.3 Modes de présentation

Ces matériaux sont normalement présentés sous forme de bandes ou de tôles.

2.4.2.1.2 Caractéristiques physiques

Outre les valeurs de la limite conventionnelle d'élasticité, une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: polarisation magnétique pour différentes valeurs d'intensité du champ magnétique à partir de laquelle la perméabilité relative peut être déduite;
- électriques: résistivité;
- mécaniques: résistance à la traction, allongement, état de surface, aptitude au poinçonnage, planéité, rectitude des rives;
- état métallurgique: laminé à chaud, laminé à chaud et «laminé à tiède», laminé à froid avec recuit final, laminé à froid, recuit et «laminé à tiède»;
- dimensions: épaisseur, largeur et (si requis) longueur.

Les valeurs d'épaisseur nominale généralement recommandées se situent dans l'intervalle de 0,5 mm à 4,5 mm.

Les gammes des valeurs spécifiées des caractéristiques mécaniques et magnétiques sont données dans le tableau 14 pour les produits laminés à chaud et dans le tableau 15 pour les produits laminés à froid.

2.4.1.2.3 Main applications

These materials are used in magnetic circuits of electrical apparatus, particularly in the stressed parts of rotating machines such as shafts for rotating machines, pole shoes, pole bodies and pole endplates.

2.4.2 Class D.2 – Flat material

2.4.2.1 Class D.21 – High strength steels – Steel with specified mechanical properties and permeability

2.4.2.1.1 General

These materials are covered by IEC 60404-8-5.

2.4.2.1.1.1 Chemical composition

The basic constituent of these materials is iron. Alloying elements may be carbon or others, for example silicon. The material also contains unavoidable impurities and a low level of other elements which may arise from additions necessitated during the manufacturing process.

2.4.2.1.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the 0,2 % proof stress value.

2.4.2.1.1.3 Available forms

The materials are normally supplied in the form of coils or sheet.

2.4.2.1.2 Physical characteristics

In addition to the proof stress values, a more complete definition of these materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: magnetic polarization at various values of magnetic field strength, from which the relative permeability can be derived;
- electrical: resistivity;
- mechanical: tensile strength, elongation, surface condition, suitability for punching operations, flatness, edge camber;
- metallurgical state: hot-rolled, hot-rolled and temper-rolled, cold-rolled and finally annealed, cold-rolled, annealed and temper-rolled;
- dimensions: thickness, width and (if required) length.

The values of nominal thickness normally recommended lie in the range from 0,5 mm to 4,5 mm.

Ranges of specified values of mechanical and magnetic properties are shown in table 14 for hot-rolled and in table 15 for cold-rolled products.

Tableau 14 – Gammes des valeurs spécifiées des caractéristiques mécaniques et magnétiques des produits laminés à chaud

Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % minimale	Résistance à la traction minimale	Allongement minimal après rupture $L_0 = 80 \text{ mm}$	Polarisation magnétique minimale pour $H =$	
			5 000 A/m	15 000 A/m
N/mm ²	N/mm ²	%	T	
250 à 700	350 à 800	22 à 10	1,60 à 1,46	1,80 à 1,78

Tableau 15 – Gammes des valeurs spécifiées des caractéristiques mécaniques et magnétiques des produits laminés à froid

Limite conventionnelle d'élasticité à 0,2 % minimale	Résistance à la traction minimale	Allongement minimal après rupture $L_0 = 80 \text{ mm}$	Polarisation magnétique minimale pour $H =$	
			5 000 A/m	15 000 A/m
N/mm ²	N/mm ²	%	T	
250 à 400	325 à 450	16 à 10	1,60 à 1,50	1,83 à 1,80

2.4.2.1.3 Applications principales

Ces matériaux sont généralement utilisés sous des conditions d'aimantation par courant continu dans les parties des circuits magnétiques de machines électriques tournantes soumises à des sollicitations mécaniques, en particulier les croisillons, les jantes et pôles.

2.4.3 Classe D.3 – Aciers inoxydables

2.4.3.1 Généralités

Ces matériaux ne sont pas actuellement couverts par une publication CEI.

2.4.3.1.1 Composition chimique

Le constituant de base de ces matériaux est le fer. L'éléments d'alliage principal est le chrome dans une proportion comprise entre 11 % et environ 20 %. D'autres éléments d'alliage, par exemple le silicium et le manganèse peuvent aussi être présents. Ces matériaux contiennent également des impuretés inévitables ainsi que de faibles proportions d'autres éléments qui peuvent provenir d'additions nécessitées par le procédé de fabrication pour améliorer l'usinabilité, par exemple le soufre, le sélénium ou le plomb ou pour accroître la résistance à la corrosion, par exemple le molybdène, le titane ou le niobium. Comparés aux aciers inoxydables conventionnels, les nuances développées pour les applications magnétiques ont des limites de composition chimique et de fabrication plus sévères pour produire des performances magnétiques mieux adaptées.

2.4.3.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification est fondée sur la teneur en chrome et les caractéristiques de fabrication selon le tableau 16.

Table 14 – Ranges of specified values of mechanical and magnetic characteristics of hot-rolled products

Minimum 0,2 % proof stress	Minimum tensile strength	Minimum elongation after fracture $L_0 = 80$ mm	Minimum magnetic polarization at $H =$	
			5 000 A/m	15 000 A/m
N/mm ²	N/mm ²	%	T	
250 to 700	350 to 800	22 to 10	1,60 to 1,46	1,80 to 1,78

Table 15 – Ranges of specified values of mechanical and magnetic characteristics of cold-rolled products

Minimum 0,2 % proof stress	Minimum tensile strength	Minimum elongation after fracture $L_0 = 80$ mm	Minimum magnetic polarization at $H =$	
			5 000 A/m	15 000 A/m
N/mm ²	N/mm ²	%	T	
250 to 400	325 to 450	16 to 10	1,60 to 1,50	1,83 to 1,80

2.4.2.1.3 Main applications

These materials are generally used under conditions of d.c. magnetization for the stressed parts of the magnetic circuits of rotating electrical machines, particularly spiders, rims and poles.

2.4.3 Class D.3 – Stainless steels

2.4.3.1 General

These materials are presently not covered by an IEC publication.

2.4.3.1.1 Chemical composition

The basic constituent of these materials is iron. The main alloying element is chromium in the range of 11 % to about 20 %. Other alloying elements, for example silicon and manganese, may also be present. The material also contains unavoidable impurities, together with a low level of other elements which may arise from additions necessitated during the manufacturing process, to improve machinability for example sulphur, selenium or lead or to enhance corrosion resistance for example molybdenum, titanium or niobium. As compared to conventional stainless steels, grades developed for magnetic applications have more stringent chemical and processing limits to yield more consistent magnetic performance.

2.4.3.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on chromium content and fabrication characteristics according to table 16.

Tableau 16 – Gammes de la composition chimique

Nuance	Cr	Si	Mo	Mn	C	S*
	%					
D31-01	11 à 13	Jusqu'à 1,5	Jusqu'à 0,5	Jusqu'à 0,8	Jusqu'à 0,065	Jusqu'à 0,025
D31-02	11 à 13	Jusqu'à 1,5	Jusqu'à 0,5	Jusqu'à 0,8	Jusqu'à 0,065	0,25 à 0,40
D31-03	16,5 à 18,5	Jusqu'à 1,5	Jusqu'à 0,5	Jusqu'à 0,8	Jusqu'à 0,065	Jusqu'à 0,025
D31-04	16,5 à 18,5	Jusqu'à 1,5	Jusqu'à 0,5	Jusqu'à 0,8	Jusqu'à 0,065	0,25 à 0,40
D31-05	16,5 à 18,5	Jusqu'à 1,5	1,0 à 2,5	Jusqu'à 1,0	Jusqu'à 0,065	Jusqu'à 0,03
D31-06	16,5 à 18,5	Jusqu'à 1,5	1,0 à 2,5	Jusqu'à 1,0	Jusqu'à 0,065	0,25 à 0,40

* Le sélénium et le plomb peuvent être ajoutés à la place ou en addition du soufre.

Les nuances D31-01, D31-03 et D31-05 sont destinées à des applications exigeant de bonnes caractéristiques de formage à froid et de soudabilité. Les nuances D31-02, D31-04 et D31-06 sont destinées à des applications exigeant une usinabilité améliorée. Les nuances D31-01 et D31-02 ont des teneurs réduites en chrome pour un coût d'alliage réduit et une polarisation à saturation élevée. Elles sont cependant seulement adaptées à des environnements modérément corrosifs. Les nuances D31-03 et D31-04 sont destinées à une utilisation dans des environnements plus corrosifs, alors que les nuances D31-05 et D 31-06 sont destinées à une utilisation dans les environnements les plus corrosifs avec cependant une certaine réduction de leur performance magnétique.

2.4.3.1.3 Modes de présentation

Ces matériaux sont normalement livrés sous forme de billettes, barres, fil machine, fils, tôles ou bandes.

2.4.3.2 Caractéristiques physiques

Une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: polarisation magnétique de saturation, perméabilité maximale, polarisation magnétique rémanente, coercitivité;
- électriques: résistivité;
- mécaniques: usinabilité, aptitude au formage à froid, soudabilité, dureté;
- chimiques: résistance à la corrosion.

Les valeurs types des caractéristiques magnétiques sont données au tableau 17 pour les matériaux à l'état fini. Bien que la teneur en chrome influe sur la polarisation magnétique et la résistivité électrique, elle n'a pas d'effet prononcé sur la perméabilité maximale et la coercitivité.

Table 16 – Ranges of chemical composition

Grade	Cr	Si	Mo	Mn	C	S*
	%					
D31-01	11 to 13	Up to 1,5	Up to 0,5	Up to 0,8	Up to 0,065	Up to 0,025
D31-02	11 to 13	Up to 1,5	Up to 0,5	Up to 0,8	Up to 0,065	0,25 to 0,40
D31-03	16,5 to 18,5	Up to 1,5	Up to 0,5	Up to 0,8	Up to 0,065	Up to 0,025
D31-04	16,5 to 18,5	Up to 1,5	Up to 0,5	Up to 0,8	Up to 0,065	0,25 to 0,40
D31-05	16,5 to 18,5	Up to 1,5	1,0 to 2,5	Up to 1,0	Up to 0,065	Up to 0,03
D31-06	16,5 to 18,5	Up to 1,5	1,0 to 2,5	Up to 1,0	Up to 0,065	0,25 to 0,40

* Selenium and lead may be added instead or in addition to sulphur.

Grades D31-01, D31-03 and D31-05 are intended for applications requiring good cold forming characteristics and weldability. Grades D31-02, D31-04 and D31-06 are intended for applications requiring improved machinability. Grades D31-01 and D31-02 have reduced chromium contents for reduced alloy cost and higher saturation polarization. They are, however, only suitable for moderately corrosive environments. Grades D31-03 and D31-04 are intended for use in more corrosive environments, while grades D31-05 and D31-06 are intended for use in the most corrosive environments though with some reduction in magnetic performance.

2.4.3.1.3 Available forms

The materials are normally supplied as billet, bar, rod, wire, sheet or strip.

2.4.3.2 Physical characteristics

A more complete definition of these materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: saturation magnetic polarization, maximum permeability, remanent magnetic polarization, coercivity;
- electrical: resistivity;
- mechanical: machinability, cold formability, weldability, hardness;
- chemical: corrosion resistance.

Typical magnetic property values are found in table 17 for fully processed materials. Although the chromium content influences the magnetic polarization and electrical resistivity, it does not have a pronounced effect on maximum permeability and coercivity.

Tableau 17 – Caractéristiques magnétiques types des matériaux à l'état fini

Nuance	Résistivité	Perméabilité maximale	Coercitivité	Polarisation magnétique pour $H =$			
	$\mu\Omega\text{m}$			300 A/m	500 A/m	1 kA/m	8 kA/m
D31-01	0,55	2 000	200	1,2	1,3	1,35	1,6
D31-02	0,55	2 000	200	1,2	1,3	1,35	1,6
D31-03	0,75	2 000	200	0,95	1,1	1,2	1,45
D31-04	0,75	2 000	200	0,95	1,1	1,2	1,45
D31-05	0,75	1 300	240	0,5	0,6	0,8	1,1
D31-06	0,75	1 300	240	0,5	0,6	0,8	1,1

2.4.3.3 Applications principales

Ces matériaux sont utilisés dans les noyaux magnétiques et autres parties requérant un acier inoxydable à haute perméabilité et ayant une force coercitive faible et un faible magnétisme rémanent: solénoïde de soupapes magnétique et dispositifs électromécaniques pour l'automobile tels que des injecteurs de combustible et les systèmes de freinage anti-bloquant.

2.5 Classe E – Alliages fer-nickel

2.5.1 Classe E.1 – Teneur en nickel comprise entre 72 % et 83 %

2.5.1.1 Généralités

Ces matériaux sont couverts par la CEI 60404-8-6.

2.5.1.1.1 Composition chimique

Les constituants de base de ces matériaux sont le fer et le nickel, la teneur en nickel étant comprise entre 72 % et 83 %. D'autres éléments d'alliage tels que molybdène, cuivre, chrome ou silicium peuvent aussi être introduits en vue d'augmenter la résistivité et d'améliorer les propriétés magnétiques. Ces matériaux contiennent encore, outre des impuretés inévitables, de faibles proportions d'autres éléments qui peuvent provenir d'additions nécessitées par le procédé de fabrication.

2.5.1.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est fondée sur la perméabilité d'amplitude pour une intensité de champ magnétique de 0,4 A/m et sur la forme du cycle d'hystérésis: rond, plat ou rectangulaire.

2.5.1.1.3 Modes de présentation

Ces matériaux sont habituellement présentés sous forme de profilés et bandes laminés à chaud, pièces forgées, fils tréfilés, bandes et tôles laminées à froid. Le plus fréquemment, la fourniture est faite à l'état semi-fini, mais un certain nombre de matériaux, en particulier ceux ayant un cycle d'hystérésis plat ou rectangulaire, sont disponibles après avoir été soumis au traitement thermique final, par exemple circuits enroulés toroïdaux.

Table 17 – Typical magnetic properties of materials in the fully processed state

Grade	Resistivity	Maximum permeability	Coercivity	Magnetic polarization at $H =$			
	$\mu\Omega\text{m}$			300 A/m	500 A/m	1 kA/m	8 kA/m
				T			
D31-01	0,55	2 000	200	1,2	1,3	1,35	1,6
D31-02	0,55	2 000	200	1,2	1,3	1,35	1,6
D31-03	0,75	2 000	200	0,95	1,1	1,2	1,45
D31-04	0,75	2 000	200	0,95	1,1	1,2	1,45
D31-05	0,75	1 300	240	0,5	0,6	0,8	1,1
D31-06	0,75	1 300	240	0,5	0,6	0,8	1,1

2.4.3.3 Main applications

These materials are used in magnetic cores and other parts requiring a high-permeability stainless steel having low coercive force and low residual magnetism: magnetic solenoid valves and automotive electromechanical devices such as fuel injectors and anti-lock braking systems.

2.5 Class E – Nickel-iron alloys

2.5.1 Class E.1 – Nickel content 72 % to 83 %

2.5.1.1 General

These materials are covered by IEC 60404-8-6.

2.5.1.1.1 Chemical composition

The basic constituents of these materials are iron and nickel whose content is in the range 72 % to 83 %. Alloying elements such as molybdenum, copper, chromium or silicon may be added to increase resistivity and improve magnetic properties. The materials also contain unavoidable impurities, together with a low level of other elements which may arise from additions necessitated during the manufacturing process.

2.5.1.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the amplitude permeability at a magnetic field strength of 0,4 A/m and the shape of the hysteresis loop: round, flat or rectangular.

2.5.1.1.3 Available forms

The materials are available as hot-rolled sections and strip, forgings, cold-drawn wire and cold-rolled sheets, strip. They are commonly supplied in the semi-processed state, but a number of materials, particular those with flat or rectangular hysteresis loop, are available in the final heat-treated state for example as toroidal strip wound cores.

2.5.1.2 Caractéristiques physiques

Une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: polarisation magnétique pour différentes valeurs d'intensité du champ magnétique, polarisation magnétique de saturation, coercitivité, perméabilité d'amplitude maximale, polarisation magnétique rémanente et domaine d'excursion statique de la polarisation magnétique;
- électriques: résistivité;
- mécaniques: aptitude au poinçonnage, aux opérations d'emboutissage profond ou d'enroulage;
- état métallurgique: état semi-fini, c'est-à-dire laminé à chaud ou à froid, les matériaux requièrent un traitement thermique pour développer complètement leurs caractéristiques magnétiques;
état fini, c'est-à-dire après avoir subi le recuit final.

Les valeurs des caractéristiques magnétiques à l'état fini sont données dans les tableaux 18 à 20.

Les mesures magnétiques sont effectuées conformément soit à la CEI 60404-4 ou à la CEI 60404-6 selon la forme du produit.

Tableau 18 – Caractéristiques magnétiques spécifiées des matériaux à cycle d'hystérésis rond

Nuance ¹⁾	Coercitivité maximale ²⁾	Perméabilité d'amplitude maximale ³⁾ pour $H = 0,4 \text{ A/m}$	Polarisation magnétique minimale pour $H =$				
			20 A/m	50 A/m	100 A/m	500 A/m	4 000 A/m
	A/m	10 ³	T				
E 11	1 à 4	100 à 30	0,50	0,65	0,70	0,73	0,75
¹⁾ Des nuances améliorées avec une perméabilité d'amplitude jusqu'à 250 000 pour $H = 0,4 \text{ A/m}$ sont disponibles. ²⁾ Seulement pour les épaisseurs $t > 0,4 \text{ mm}$. ³⁾ Seulement pour les épaisseurs $0,4 \text{ mm} \leq t \leq 1,5 \text{ mm}$.							

Tableau 19 – Caractéristiques magnétiques types des matériaux à cycle d'hystérésis plat

Polarisation magnétique de saturation	Polarisation magnétique rémanente	Niveau d'excitation de l'intensité du champ magnétique	Amplitude de la polarisation magnétique	Domaine d'excursion statique de la polarisation magnétique $f = 50 \text{ Hz}$
T	T	A/m	T	T
0,74	0,2	1,5	0,22	0,18
0,74	0,15	5	0,44	0,35
0,74	0,1	10	0,44	0,38

2.5.1.2 Physical characteristics

A more complete definition of the material can be based on the following characteristics:

- magnetic: magnetic polarization at various values of magnetic field strength, saturation magnetic polarization, coercivity, maximum amplitude permeability, remanent magnetic polarization and static excursion range of magnetic polarization;
- electrical: resistivity;
- mechanical: suitability for punching, deep drawing operations or winding;
- metallurgical state: semi-processed state, i.e. hot- or cold-worked, the materials require a heat treatment to develop their full magnetic properties;
fully processed state, i.e. finally annealed.

Values for magnetic properties in the fully processed state are given in tables 18 to 20.

Magnetic measurements are made in accordance with either IEC 60404-4 or IEC 60404-6 according to product form.

Table 18 – Specified magnetic properties of material with a round hysteresis loop

Grade ¹⁾	Maximum coercivity ²⁾	Minimum amplitude permeability ³⁾ at $H = 0,4 \text{ A/m}$	Minimum magnetic polarization at $H =$				
			20 A/m	50 A/m	100 A/m	500 A/m	4 000 A/m
	A/m	10^3	T				
E 11	1 to 4	100 to 30	0,50	0,65	0,70	0,73	0,75
¹⁾ Improved grades with minimum amplitude permeability up to 250 000 at $H = 0,4 \text{ A/m}$ are available. ²⁾ Only for thicknesses $t > 0,4 \text{ mm}$. ³⁾ Only for thicknesses $0,4 \text{ mm} \leq t \leq 1,5 \text{ mm}$.							

Table 19 – Typical magnetic properties of material with a flat hysteresis loop

Saturation magnetic polarization	Remanent magnetic polarization	Measuring point amplitude of magnetic field strength	Amplitude of magnetic polarization	Static excursion range of magnetic polarization $f = 50 \text{ Hz}$
T	T	A/m	T	T
0,74	0,2	1,5	0,22	0,18
0,74	0,15	5	0,44	0,35
0,74	0,1	10	0,44	0,38

Tableau 20 – Caractéristiques magnétiques types des matériaux à cycle d'hystérésis rectangulaire

Polarisation magnétique de saturation	Coercitivité	Polarisation magnétique rémanente	Perméabilité d'amplitude maximale
T	A/m	T	
0,8	0,8	0,73	250 000

2.5.1.3 Applications principales

Les matériaux sont utilisés lorsqu'une perméabilité élevée pour une intensité faible du champ magnétique combinée avec une polarisation magnétique de saturation ou rémanente élevée est requise.

- a) cycle d'hystérésis rond: instruments de mesure, transformateurs de courant, transformateurs de faible puissance, parties de relais, transducteurs, disjoncteurs différentiels, empilages de rotor et stator, blindage magnétique.
- b) cycle d'hystérésis plat: transformateurs d'impulsions, starter de protection des thyristors, disjoncteurs différentiels.
- c) cycle d'hystérésis rectangulaire: amplificateurs magnétiques, convertisseurs courant alternatif/courant continu, inductances saturables, noyaux de transformateurs d'impulsions.

2.5.2 Classe E.2 – Teneur en nickel comprise entre 54 % et 68 %

2.5.2.1 Généralités

Ces matériaux sont couverts par la CEI 60404-8-6.

2.5.2.1.1 Composition chimique

Les constituants de base de ces matériaux sont le fer et le nickel, la teneur en nickel étant comprise entre 54 % et 68 %. Dans certains cas, du cobalt peut être substitué à une partie du nickel. D'autres éléments d'alliage tels que molybdène, cuivre, chrome, silicium peuvent aussi être introduits en vue d'augmenter la résistivité et d'améliorer les propriétés magnétiques. Les matériaux contiennent encore, outre des impuretés inévitables, de faibles proportions d'autres éléments qui peuvent provenir d'additions nécessitées par le procédé de fabrication.

2.5.2.1.2 Base de sous-classification

Une possible base est la forme du cycle d'hystérésis: rond ou plat (recuit sous champ magnétique).

2.5.2.1.3 Modes de présentation

Ces matériaux sont disponibles sous forme de bandes laminées à froid et à l'état semi-fini ou sous forme de noyaux bobinés à l'état fini.

Table 20 – Typical magnetic properties of material with a rectangular hysteresis loop

Saturation magnetic polarization	Coercivity	Remanent magnetic polarization	Maximum amplitude permeability
T	A/m	T	
0,8	0,8	0,73	250 000

2.5.1.3 Main applications

The materials are used where high permeability at low magnetic field strength in combination with high remanent or saturation magnetic polarization is required.

- a) Round hysteresis loop: measuring instruments, current transformers, low-power transformers, relay parts, transducers, protective ground-fault circuit breakers, rotor and stator laminations, magnetic shielding;
- b) Flat hysteresis loop: pulse transformers, thyristor protective chokes, protective ground-fault circuit-breakers;
- c) Rectangular hysteresis loop: magnetic amplifiers, a.c./d.c. converters, saturable inductors, pulse transformer cores.

2.5.2 Class E.2 – Nickel content 54 % to 68 %

2.5.2.1 General

These materials are covered by IEC 60404-8-6.

2.5.2.1.1 Chemical composition

The basic constituents of these materials are iron and nickel whose content is in the range 54 % to 68 %. In some instances, part of the nickel may be replaced by cobalt. Additionally, molybdenum, copper, chromium or silicon may be present to increase resistivity and improve magnetic properties. The materials also contain unavoidable impurities, together with a low level of other elements which may arise from additions necessitated during the manufacturing process.

2.5.2.1.2 Basis of subclassification

A possible basis is the shape of the hysteresis loop: round or flat (magnetic field annealed).

2.5.2.1.3 Available forms

The materials are available as semi-processed cold-rolled strip or fully processed strip-wound cores.

2.5.2.2 Caractéristiques physiques

Une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: perméabilité d'amplitude maximale, polarisation magnétique de saturation, polarisation magnétique rémanente, coercitivité;
- électriques: résistivité;
- mécaniques: aptitude aux opérations d'enroulage;
- état métallurgique: état semi-fini, c'est-à-dire laminé à froid ou état fini, c'est-à-dire après avoir subi le recuit final (avec ou sans champ magnétique).

Les valeurs types des caractéristiques magnétiques à l'état fini sont données dans les tableaux 21 et 22.

Les mesures magnétiques sont effectuées conformément à la CEI 60404-6.

Tableau 21 – Caractéristiques magnétiques types des matériaux à cycle d'hystérésis rond

Nuance	Coercitivité	Perméabilité d'amplitude pour $H = 0,4 \text{ A/m}$	Perméabilité d'amplitude maximale
	A/m		
E 21	1,2	50 000	110 000

Tableau 22 – Caractéristiques magnétiques types des matériaux à cycle d'hystérésis plat

Coercitivité	Polarisation magnétique de saturation	Domaine d'excursion statique de la polarisation magnétique	Polarisation magnétique rémanente
A/m	T	T	T
5 à 7	1,5 à 1,25	0,8	0,2 à 0,1

2.5.2.3 Applications principales

Les matériaux sont utilisés quand il est nécessaire d'obtenir une perméabilité élevée en présence d'intensités de champ magnétique faibles.

- a) Cycle d'hystérésis rond: disjoncteurs différentiels, transducteurs, transformateurs de mesure;
- b) Cycle d'hystérésis plat: disjoncteurs différentiels, transformateurs d'impulsions, starters de protection des thyristors.

2.5.3 Classe E.3 – Teneur en nickel comprise entre 45 % et 50 %

2.5.3.1 Généralités

Ces matériaux sont couverts par la CEI 60404-8-6.

2.5.2.2 Physical characteristics

A more complete definition of these materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: maximum amplitude permeability, saturation magnetic polarization, remanent magnetic polarization, coercivity;
- electrical: resistivity;
- mechanical: suitability for winding operations;
- metallurgical state: semi-processed state, i.e. cold-rolled or
fully processed state, i.e. finally annealed (with or without magnetic field).

Typical values for magnetic properties in the fully processed state are given in tables 21 and 22.

Magnetic measurements are made in accordance with IEC 60404-6.

Table 21 – Typical magnetic properties of material with a round hysteresis loop

Grade	Coercivity	Amplitude permeability at $H = 0,4 \text{ A/m}$	Maximum amplitude permeability
	A/m		
E 21	1,2	50 000	110 000

Table 22 – Typical magnetic properties of material with a flat hysteresis loop

Coercivity	Saturation magnetic polarization	Static excursion range of magnetic polarization	Remanent magnetic polarization
A/m	T	T	T
5 to 7	1,5 to 1,25	0,8	0,2 to 0,1

2.5.2.3 Main applications

The materials are used where high permeability at low magnetic field strength is required.

- a) Round hysteresis loop: protective ground-fault circuit-breakers, transducers, measuring transformers;
- b) Flat hysteresis loop: protective ground-fault circuit-breakers, pulse transformers, thyristor protective choke.

2.5.3 Class E.3 – Nickel content 45 % to 50 %

2.5.3.1 General

These materials are covered by IEC 60404-8-6.

2.5.3.1.1 Composition chimique

Les constituants de base de ces matériaux sont le fer et le nickel, la teneur en nickel étant comprise entre 45 % et 50 %. D'autres éléments d'alliage tels que molybdène, cuivre, chrome ou silicium peuvent aussi être introduits en vue d'augmenter la résistivité et d'améliorer les propriétés magnétiques. Les matériaux contiennent encore, outre des impuretés inévitables, de faibles proportions d'autres éléments qui peuvent provenir d'additions nécessitées par le procédé de fabrication.

2.5.3.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est fondée sur la perméabilité d'amplitude pour une intensité de champ magnétique de 0,4 A/m ou sur la forme de cycle d'hystérésis: rond (isotrope) plat (recuit sous champ magnétique) ou rectangulaire (anisotrope).

2.5.3.1.3 Modes de présentation

Les matériaux isotropes sont livrés sous forme de profilés et bandes laminés à chaud, pièces forgées, fils tréfilés et tôles et bandes laminées à froid.

Les matériaux à cycle d'hystérésis plat sont livrés sous forme de noyaux bobinés.

Les matériaux anisotropes sont disponibles sous forme de bandes laminées à froid ou rubans.

2.5.3.2 Caractéristiques physiques

Une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: polarisation magnétique pour différentes valeurs d'intensité de champ magnétique, polarisation magnétique de saturation, coercitivité, taux de rémanence;
- électriques: résistivité;
- mécaniques: aptitude aux opérations de poinçonnage ou d'emboutissage profond;
- état métallurgique: à état semi-fini, c'est-à-dire formé à froid ou à chaud, recuit; les matériaux nécessitent un traitement thermique pour développer toutes leurs propriétés magnétiques;
à état fini, c'est-à-dire après avoir subi le recuit final.

Les valeurs des caractéristiques magnétiques à l'état fini sont données dans les tableaux 23 à 25.

Les mesures magnétiques sont effectuées conformément soit à la CEI 60404-4 soit à la CEI 60404-6 selon la forme du produit.

Tableau 23 – Caractéristiques magnétiques¹⁾ spécifiées du matériau à cycle d'hystérésis rond

Nuance	Coercitivité maximale	Perméabilité d'amplitude minimale ²⁾ pour $H = 0,4 \text{ A/m}$	Polarisation magnétique minimale pour $H =$				
			20 A/m	50 A/m	100 A/m	500 A/m	4 000 A/m
	A/m	10^3	T				
E 31	6 à 12	10 à 4	0,5	0,9	1,1	1,35	1,45

1) Seulement pour les épaisseurs $t > 0,4 \text{ mm}$.

2) Seulement pour les épaisseurs $0,4 \text{ mm} \leq t \leq 1,5 \text{ mm}$.

2.5.3.1.1 Chemical composition

The basic constituents of these materials are iron and nickel whose content is in the range 45 % to 50 %. Alloying elements such as molybdenum, copper, chromium or silicon may be added to increase resistivity and improve magnetic properties. The materials also contain unavoidable impurities, together with a low level of other elements which may arise from additions necessitated during the manufacturing process.

2.5.3.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the amplitude permeability at a magnetic field strength of 0,4 A/m or the shape of the hysteresis loop: round (isotropic), flat (magnetic field annealed) or rectangular (anisotropic).

2.5.3.1.3 Available forms

The isotropic materials are available as hot-rolled sections and strip, forgings, cold drawn wire and cold-rolled sheet and strip.

The materials with flat hysteresis loop are available as strip-wound core.

The anisotropic materials are available as cold-rolled strip or tape.

2.5.3.2 Physical characteristics

A more complete definition of these materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: magnetic polarization at various values of magnetic field strength, saturation magnetic polarization, coercivity, remanence ratio;
- electrical: resistivity;
- mechanical: suitability for punching or deep drawing operation;
- metallurgical state: semi-processed state: i.e. hot- or cold-worked, annealed; the materials require a heat treatment to develop their full magnetic properties;
fully processed state: i.e. finally annealed.

Values for magnetic properties in the fully processed state are given in tables 23 to 25.

Magnetic measurements are made in accordance with either IEC 60404-4 or IEC 60404-6, according to product form.

Table 23 – Specified magnetic properties¹⁾ of material with a round hysteresis loop

Grade	Maximum coercivity	Minimum amplitude permeability²⁾ at H = 0,4 A/m	Minimum magnetic polarization at H =				
			20 A/m	50 A/m	100 A/m	500 A/m	4 000 A/m
	A/m	10 ³	T				
E 31	6 to 12	10 to 4	0,5	0,9	1,1	1,35	1,45

1) Only for thicknesses $t > 0,4 \text{ mm}$.

2) Only for thicknesses $0,4 \text{ mm} \leq t \leq 1,5 \text{ mm}$.

Tableau 24 – Caractéristiques magnétiques types des matériaux à cycle d'hystérésis plat

Coercitivité	Polarisation magnétique de saturation	Domaine d'excursion statique de la polarisation magnétique	Polarisation magnétique rémanente
A/m	T	T	T
7	1,52	1,1	0,08 à 0,23

Tableau 25 – Caractéristiques magnétiques types des matériaux à cycle d'hystérésis rectangulaire

Polarisation magnétique de saturation	Coercitivité	Polarisation magnétique rémanente	Perméabilité d'amplitude maximale
T	A/m	T	T
1,55 à 1,60	12 à 8	1,5 à 1,57	50 000 à 70 000

2.5.3.3 Applications principales

Les matériaux sont utilisés lorsqu'une perméabilité élevée pour une intensité faible du champ magnétique combinée avec une polarisation magnétique de saturation ou rémanente élevée est requise.

- a) Cycle d'hystérésis rond: instruments de mesure, transformateurs de courant, transformateurs de faible puissance, éléments de relais, transducteurs, disjoncteurs différentiels, empilages de rotor et stator, blindage magnétique;
- b) Cycle d'hystérésis plat: transformateurs d'impulsions, starters de protection des thyristors, disjoncteurs différentiels;
- c) Cycle d'hystérésis rectangulaire: amplificateurs magnétiques, convertisseurs alternatif/continu, inductances saturables, noyaux de transformateurs d'impulsions.

2.5.4 Classe E.4 – Teneur en nickel comprise entre 35 % et 40 %

2.5.4.1 Généralités

Ces matériaux sont couverts par la CEI 60404-8-6.

2.5.4.1.1 Composition chimique

Les constituants de base de ces matériaux sont le fer et le nickel, dans une teneur comprise entre 35 % et 40 %. D'autres éléments d'alliage tels que molybdène, cuivre, chrome, silicium peuvent aussi être introduits en vue d'augmenter la résistivité et d'améliorer les propriétés magnétiques. Les matériaux contiennent encore, outre des impuretés inévitables, de faibles proportions d'autres éléments qui peuvent provenir d'additions nécessitées par le procédé de fabrication.

2.5.4.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est fondée sur la perméabilité d'amplitude pour une intensité de champ magnétique de 1,6 A/m.

Table 24 – Typical magnetic properties of material with a flat hysteresis loop

Coercivity	Saturation magnetic polarization	Static excursion range of magnetic polarization	Remanent magnetic polarization
A/m	T	T	T
7	1,52	1,1	0,08 to 0,23

Table 25 – Typical magnetic properties of material with a rectangular hysteresis loop

Saturation magnetic polarization	Coercivity	Remanent magnetic polarization	Maximum amplitude permeability
T	A/m	T	T
1,55 to 1,60	12 to 8	1,5 to 1,57	50 000 to 70 000

2.5.3.3 Main applications

The materials are used where high permeability at low magnetic field strength in combination with high remanent or saturation magnetic polarization is required.

- a) Round hysteresis loop: measuring instruments, current transformers, low-power transformers, relay parts, transducers, protective ground-fault circuit-breakers, rotor and stator laminations, magnetic shielding,
- b) Flat hysteresis loop: pulse transformers, thyristor protective chokes, protective ground fault circuit breakers;
- c) Rectangular hysteresis loop: magnetic amplifiers, a.c./d.c. converters, saturable inductors, pulse transformer cores.

2.5.4 Class E.4 – Nickel content 35 % to 40 %

2.5.4.1 General

These materials are covered by IEC 60404-8-6.

2.5.4.1.1 Chemical composition

The basic constituents of these materials are iron and nickel whose content is in the range 35 % to 40 %. Alloying elements such as molybdenum, copper, chromium or silicon may be added to increase resistivity and improve magnetic properties. The materials also contain unavoidable impurities, together with a level of other elements which may arise from additions necessitated during the manufacturing process.

2.5.4.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the amplitude permeability at a magnetic field strength of 1,6 A/m.

2.5.4.1.3 Modes de présentation

Les matériaux sont livrés sous forme de profilés et bandes laminés à chaud, pièces forgées, fils tréfilés, tôles et bandes laminées à froid. Le plus fréquemment, la fourniture est faite à l'état semi-fini mais un certain nombre de matériaux sont disponibles à l'état fini.

2.5.4.2 Caractéristiques physiques

Une définition plus complète du matériau peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: coercitivité, polarisation magnétique pour différentes valeurs d'intensité du champ magnétique;
- électriques: résistivité;
- mécaniques: aptitude au poinçonnage et à l'emboutissage profond;
- état métallurgique: à l'état semi-fini, c'est-à-dire formé à froid ou à chaud, recuit, les matériaux requièrent un traitement thermique pour développer complètement leurs caractéristiques magnétiques;
à l'état fini, c'est-à-dire après avoir subi le recuit final.

Les valeurs spécifiées des caractéristiques magnétiques pour l'état fini sont données dans le tableau 26.

Les mesures magnétiques sont effectuées conformément soit à la CEI 60404-4 soit la CEI 60404-6, selon la forme du produit.

Tableau 26 – Caractéristiques magnétiques spécifiées à l'état fini

Nuance ³⁾	Coercitivité maximale ²⁾	Perméabilité d'amplitude minimale ¹⁾ pour $H = 1,6 \text{ A/m}$	Polarisation magnétique minimale ²⁾ pour $H =$				
	A/m		20 A/m	50 A/m	100 A/m	500 A/m	4 000 A/m
E 41-02	–	2 200	–	–	–	–	–
E 41-03	24	2 900	0,20	0,45	0,70	1,00	1,18

1) Seulement pour les épaisseurs $0,1 \text{ mm} \leq t \leq 0,38 \text{ mm}$.

2) Seulement pour les épaisseurs $t > 0,4 \text{ mm}$.

3) Des nuances améliorées avec une perméabilité d'amplitude minimale jusqu'à 9 000 pour $H = 0,4 \text{ A/m}$ sont disponibles.

2.5.4.3 Applications principales

Les matériaux sont utilisés pour des applications à hautes fréquences et avec impulsions, des traducteurs de télécommunications, des filtres ou transformateurs haute fréquence, des transformateurs de séparation, des transformateurs d'impulsions, des blindages magnétiques.

2.5.5 Classe E.5 – Teneur en nickel comprise entre 29 % et 33 %

2.5.5.1 Généralités

Ces matériaux ne sont pas couverts par une publication CEI.

2.5.4.1.3 Available forms

The materials are available as hot-rolled sections and strips, forgings, cold-drawn wire and cold-rolled sheet and strip. It is commonly supplied in the semi-processed state, but a number of materials are available in the fully processed state.

2.5.4.2 Physical characteristics

A more complete definition of the material can be based on the following characteristics:

- magnetic: coercivity, magnetic polarization at various values of magnetic field strength;
- electrical: resistivity;
- mechanical: suitability for punching and deep drawing operations;
- metallurgical state: semi-processed state: i.e. hot- or cold-worked, annealed, the materials require a heat treatment to develop their full magnetic properties;
fully processed state: i.e. finally annealed.

Specified values for magnetic properties of materials in the fully processed state are given in table 26.

Magnetic measurements are made in accordance with either IEC 60404-4 or IEC 60404-6, according to product form.

Table 26 – Specified magnetic properties of materials in the fully processed state

Grade ³⁾	Maximum coercivity ²⁾	Minimum amplitude permeability ¹⁾ at $H = 1,6 \text{ A/m}$	Minimum magnetic polarization ²⁾ at $H =$				
	A/m		20 A/m	50 A/m	100 A/m	500 A/m	4 000 A/m
E 41-02	–	2 200	–	–	–	–	–
E 41-03	24	2 900	0,20	0,45	0,70	1,00	1,18

1) Only for thicknesses $0,1 \text{ mm} \leq t \leq 0,38 \text{ mm}$.
 2) Only for thicknesses $t > 0,4 \text{ mm}$.
 3) Improved grades with minimum amplitude permeability up to 9 000 at $H = 0,4 \text{ A/m}$ are available.

2.5.4.3 Main applications

The materials are used for high-frequency and pulse applications, telecommunication translators, high-frequency filters or transformers, blocking transformers, pulse transformers, magnetic shields.

2.5.5 Class E.5 – Nickel content 29 % to 33 %

2.5.5.1 General

These materials are not covered by an IEC publication.

2.5.5.1.1 Composition chimique

Les constituants de base de ces matériaux sont le fer et le nickel. La température de Curie dépend fortement de la teneur en nickel. D'autres éléments d'alliage comme le cuivre peuvent aussi être introduits pour améliorer les caractéristiques magnétiques. Les matériaux contiennent encore, outre des impuretés inévitables, de faibles proportions d'autres éléments qui peuvent provenir d'additions nécessitées par le procédé de fabrication.

2.5.5.1.2 Base de sous-classification

Une base possible de sous-classification est la température maximale de service.

2.5.5.1.3 Modes de présentation

Les matériaux sont livrés sous forme de bandes laminées à froid, ou de fils tréfilés habituellement à l'état fini.

2.5.5.2 Caractéristiques physiques

Une définition plus complète des matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: variation de la polarisation magnétique en fonction de la température pour une intensité donnée du champ magnétique et pour un domaine donné de température;
- électriques: résistivité;
- état métallurgique: état semi-fini, c'est-à-dire laminé à froid ou tréfilé; état fini après avoir subi le recuit final.

Des valeurs types de caractéristiques magnétiques pour l'état fini sont données dans le tableau 27.

Tableau 27 – Caractéristiques magnétiques typiques

Température de Curie	Polarisation magnétique à 0 °C et pour $H = 10 \text{ kA/m}$	$\Delta B/\Delta T$ pour $H = 10 \text{ kA/m}$
°C	T	T/K
30 à 120	0,15 à 0,7	–0,005 à –0,007

2.5.5.3 Applications principales

Compensateurs de température (shunts magnétiques) pour les dispositifs de mesure à aimants permanents, en particulier pour les compteurs électriques (watt-heure) et les régulateurs de tension pour automobiles.

2.6 Classe F – Alliages fer-cobalt

2.6.1 Classe F.1 – Teneur en cobalt comprise entre 47 % et 50 %

2.6.1.1 Généralités

Ces matériaux sont couverts par la CEI 60404-8-6.

2.5.5.1.1 Chemical composition

The basic constituents of these materials are iron and nickel. The Curie temperature is strongly dependent on the nickel content. Alloying elements such as copper may be added to improve magnetic performance. The materials also contain unavoidable impurities together with a low level of other elements which may arise from additions necessitated during the manufacturing process.

2.5.5.1.2 Basis of subclassification

A possible basis of subclassification is the maximum service temperature.

2.5.5.1.3 Available forms

The materials are supplied as cold-rolled strip or cold-drawn wire usually in the fully processed condition.

2.5.5.2 Physical characteristics

A more complete definition of the materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: change of magnetic polarization with temperature for a given magnetic field strength and a given range of temperature;
- electrical: resistivity;
- metallurgical state: semi-processed, i.e. cold-rolled or cold-drawn;
fully processed, i.e. finally annealed.

Typical values of characteristic magnetic properties in the fully processed state are given in table 27.

Table 27 – Typical magnetic properties

Curie temperature	Magnetic polarization at 0 °C and at $H = 10 \text{ kA/m}$	$\Delta B/\Delta T$ at $H = 10 \text{ kA/m}$
°C	T	T/K
30 to 120	0,15 to 0,7	–0,005 to –0,007

2.5.5.3 Main applications

Temperature compensators (magnetic shunts) for permanent magnet measuring devices especially for electric current (watt-hour) meters and automotive voltage regulators.

2.6 Class F – Iron-cobalt alloys

2.6.1 Class F.1 – Cobalt content 47 % to 50 %

2.6.1.1 General

These materials are covered by IEC 60404-8-6.

2.6.1.1.1 Composition chimique

Les constituants de base de ces matériaux sont le fer et le cobalt, la teneur en cobalt étant comprise entre 47 % et 50 %. Des éléments d'alliage tels que le vanadium, le chrome, le niobium ou le tantale peuvent être ajoutés pour améliorer la ductilité.

2.6.1.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est fondée sur la coercitivité et la forme du cycle d'hystérésis.

2.6.1.1.3 Mode de présentation

Les matériaux à cycle d'hystérésis rond sont livrés sous forme de barres laminées à chaud à section circulaire ou rectangulaire, fils tréfilés, bandes et tôles, pièces forgées, bandes laminées à froid. Les matériaux à cycle d'hystérésis rectangulaire sont livrés sous la forme de bandes ou de rubans ou de noyaux en feuillard bobinés.

2.6.1.2 Caractéristiques physiques

Une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: perméabilité maximale relative, polarisation magnétique de saturation, polarisation magnétique pour différentes valeurs d'intensité du champ magnétique, rémanence, coercitivité, pertes totales spécifiques;
- mécaniques: aptitude aux opérations de poinçonnage pour l'état formé à froid, usinabilité pour l'état formé à chaud ou traité thermiquement, limite apparente d'élasticité;
- état métallurgique: les matériaux à cycle d'hystérésis rond sont habituellement livrés à l'état semi-fini, c'est-à-dire formés à chaud ou à froid et requièrent un traitement thermique pour développer complètement leurs caractéristiques magnétiques;
les matériaux à cycle d'hystérésis rectangulaire sont livrés à l'état fini c'est-à-dire après avoir subi le recuit final.

Les mesures magnétiques sont effectuées conformément soit à la CEI 60404-4 soit à la CEI 60404-6, selon la forme du produit.

Les valeurs des caractéristiques magnétiques après recuit final sont données dans les tableaux 28 et 29.

Tableau 28 – Gammes des caractéristiques magnétiques spécifiées des matériaux à cycle d'hystérésis rond

Nuance	Coercitivité maximale	Polarisation magnétique minimale pour $H =$				
		300 A/m	800 A/m	1 600 A/m	4 000 A/m	8 000 A/m
	A/m	T				
F 11	60 à 240	1,8 à 1,4	2,1 à 1,7	2,2 à 1,9	2,25 à 2,05	2,25 à 2,15

2.6.1.1.1 Chemical composition

The basic constituents of these materials are iron and cobalt whose content is in the range 47 % to 50 %. Alloying elements such as vanadium, chromium, niobium or tantalum may be added to improve ductility.

2.6.1.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the coercivity and the shape of the hysteresis loop.

2.6.1.1.3 Available forms

The materials with round hysteresis loop are supplied as hot-rolled rectangular and round bars, cold-drawn wire, strip and sheet, forgings and cold-rolled strip. Materials with rectangular hysteresis loop are available as strip or tape or as strip wound cores.

2.6.1.2 Physical characteristics

A more complete definition of the material can be based on the following characteristics:

- magnetic: maximum relative permeability, saturation magnetic polarization, magnetic polarization for various values of magnetic field strength, remanence, coercivity, specific total loss;
- mechanical: suitability for punching operations in the cold-worked state, machinability in the hot-worked or heat-treated state, yield strength;
- metallurgical state: materials with round hysteresis loop are commonly supplied in the semi-processed state i.e. hot- or cold-worked and require a heat treatment to develop their full magnetic properties;
materials with rectangular hysteresis loop are supplied in the fully processed state, i.e. finally annealed.

Magnetic measurements are made in accordance with either IEC 60404-4 or IEC 60404-6, according to product form.

Values for magnetic properties of finally annealed material are given in tables 28 and 29.

Table 28 – Ranges of specified magnetic properties of material with a round hysteresis loop

Grade	Maximum coercivity A/m	Minimum magnetic polarization at $H =$				
		300 A/m	800 A/m	1 600 A/m	4 000 A/m	8 000 A/m
		T				
F 11	60 to 240	1,8 to 1,4	2,1 to 1,7	2,2 to 1,9	2,25 to 2,05	2,25 to 2,15

Tableau 29 – Caractéristiques magnétiques types des matériaux à cycle d'hystérésis rectangulaire

Nuance	Coercitivité	Rémanence magnétique
	A/m	T
F 12	20 à 40	1,90 à 2,10

2.6.1.3 Applications principales

Les matériaux isotropes sont employés pour les applications requérant des polarisations magnétiques extrêmement élevées sous des champs magnétiques faibles ou moyens tels que transformateurs, relais, composants électromagnétiques et électromécaniques pour équipement aéronautique ou aérospatial, membranes d'écouteurs téléphoniques, pièces polaires d'électro-aimants, lentilles magnétiques et roulements magnétiques.

Les matériaux anisotropes sont utilisés pour les amplificateurs magnétiques à charge élevée et volume réduit, ainsi que pour des transformateurs spéciaux.

2.6.2 Classe F.2 – Teneur en cobalt de 35 %

2.6.2.1 Généralités

Ces matériaux sont couverts par la CEI 60404-8-6.

2.6.2.1.1 Composition chimique

Les constituants de base de ces matériaux sont le fer et le cobalt, la teneur en cobalt étant d'environ 35 %. Des éléments d'alliage tels que le vanadium ou le chrome peuvent être ajoutés pour améliorer la ductilité.

2.6.2.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est fondée sur la coercitivité.

2.6.2.1.3 Modes de présentation

Les matériaux sont livrés sous la forme de tôles et bandes laminées à chaud, de pièces forgées et de pièces moulées.

2.6.2.2 Caractéristiques physiques

Une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: polarisation magnétique pour différentes valeurs d'intensité du champ magnétique, polarisation magnétique de saturation;
- mécaniques: usinabilité pour l'état formé à chaud ou traité thermiquement;
- état métallurgique: à l'état semi-fini, c'est-à-dire formé à froid ou à chaud; ces matériaux requièrent un traitement thermique pour développer complètement leurs caractéristiques magnétiques.

Les mesures magnétiques sont effectuées conformément soit à la CEI 60404-4 soit à la CEI 60404-6 selon la forme du produit.

**Table 29 – Typical magnetic properties of material
with a rectangular hysteresis loop**

Grade	Coercivity	Remanence
	A/m	T
F 12	20 to 40	1,90 to 2,10

2.6.1.3 Main applications

Isotropic materials are used in applications involving extremely high magnetic polarizations in low or medium magnetic fields such as transformers, relays, electromagnetic and electro-mechanical devices for aeronautical or aerospace equipment, telephone membranes, pole pieces for electromagnets, magnetic lenses and magnetic bearings.

Anisotropic materials are used for space-saving highly loaded magnetic amplifiers and special-purpose transformers.

2.6.2 Class F.2 – Cobalt content 35 %

2.6.2.1 General

These materials are covered by IEC 60404-8-6.

2.6.2.1.1 Chemical composition

The basic constituents of these materials are iron and cobalt the content of which is approximately 35 %. Alloying elements such as vanadium or chromium may be added to improve ductility.

2.6.2.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the coercivity.

2.6.2.1.3 Available forms

The materials are available as hot-rolled strip and sheet, forgings and castings.

2.6.2.2 Physical characteristics

A more complete definition of the materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: magnetic polarization for various values of magnetic field strength, saturation magnetic polarization;
- mechanical: machinability in the hot-worked or heat-treated state;
- metallurgical state: semi-processed state, i.e. hot-rolled or hot-worked; the material requires a heat treatment to develop its full magnetic properties.

Magnetic measurements are made in accordance with either IEC 60404-4 or IEC 60404-6, according to product form.

Les valeurs spécifiées des caractéristiques magnétiques des matériaux avec recuit final sont données dans le tableau 30.

Tableau 30 – Caractéristiques magnétiques spécifiées

Nuance		Coercitivité maximale	Polarisation magnétique minimale pour $H =$			
			800 A/m	1 600 A/m	4 000 A/m	8 000 A/m
		A/m	T			
F 21	Matériau massif	300	1,2	1,3	–	–
	Tôle ou bande		1,5	1,6	2,0	2,2

2.6.2.3 Applications principales

Les matériaux sont principalement utilisés pour les applications impliquant des polarisations magnétiques extrêmement élevées ou des températures de service inhabituellement hautes et pour pièces polaires d'électro-aimants.

2.6.3 Classe F.3 – Teneur en cobalt entre 23 % et 27 %

2.6.3.1 Généralités

Ces matériaux sont couverts par la CEI 60404-8-6.

2.6.3.1.1 Composition chimique

Les constituants de base de ces matériaux sont le fer et le cobalt, la teneur en cobalt étant comprise entre 23 % et 27 %. Des éléments d'alliage tels le vanadium ou le chrome peuvent être ajoutés pour améliorer la ductilité.

2.6.3.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est fondée sur la coercitivité.

2.6.3.1.3 Modes de présentation

Les matériaux sont disponibles sous la forme de barres rondes, de tôles et de bandes laminées à chaud, de pièces forgées, de fils tréfilés, de bandes et rubans laminés à froid.

2.6.3.2 Caractéristiques physiques

Une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: polarisation magnétique pour différentes valeurs d'intensité du champ magnétique, polarisation magnétique de saturation;
- mécaniques: ductilité, aptitude au poinçonnage pour l'état formé à froid et usinabilité pour l'état formé à chaud ou traité thermiquement;
- état métallurgique: état semi-fini, c'est-à-dire laminé à chaud, laminé à froid, forgé, moulé ou tréfilé. Le matériau requiert un traitement thermique pour développer complètement ses caractéristiques magnétiques.

Specified values for magnetic properties of the finally annealed materials are given in table 30.

Table 30 – Specified magnetic properties

Grade		Maximum coercivity	Minimum magnetic polarization at $H =$			
			800 A/m	1 600 A/m	4 000 A/m	8 000 A/m
		A/m	T			
F 21	Bulk material	300	1,2	1,3	–	–
	Strip or sheet		1,5	1,6	2,0	2,2

2.6.2.3 Main applications

The materials are mainly used for applications involving either extremely high magnetic polarizations or unusually high temperatures and as pole pieces for electromagnets.

2.6.3 Class F.3 – Cobalt content 23 % to 27 %

2.6.3.1 General

These materials are covered by IEC 60404-8-6.

2.6.3.1.1 Chemical composition

The basic constituents of these materials are iron and cobalt of which the content is in the range 23 % to 27 %. Alloying elements such as vanadium or chromium may be added to improve ductility.

2.6.3.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the coercivity.

2.6.3.1.3 Available forms

The materials are available as hot-rolled round bars, hot-rolled sheet and strip, forgings, cold-drawn wire and cold-rolled strip and tape.

2.6.3.2 Physical characteristics

A more complete definition of the materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: magnetic polarization for various values of magnetic field strength, saturation magnetic polarization;
- mechanical: ductility; suitability for punching operations in the cold-worked state and machinability in the hot-worked or heat-treated state;
- metallurgical state: semi-processed state, i.e. hot-rolled, cold-rolled, forged, cast or cold-drawn. The material requires a heat treatment to develop its full magnetic properties.

Les mesures magnétiques sont effectuées conformément soit à la CEI 60404-4 soit à la CEI 60404-6 selon la forme du produit.

Les valeurs spécifiées des caractéristiques magnétiques du matériau avec recuit final sont données dans le tableau 31.

Tableau 31 – Caractéristiques magnétiques spécifiées

Nuance		Coercitivité maximale	Polarisation magnétique minimale pour $H =$	
			4 000 A/m	8 000 A/m
		A/m	T	
F 31	Matériau massif	300	1,1	1,75
	Tôle ou bande		1,85	2,0

2.6.3.3 Applications principales

Ces matériaux sont essentiellement employés pour des applications à polarisation magnétique très élevée ou pour service à températures particulièrement hautes, telles que dispositifs électromagnétiques ou électromécaniques pour l'équipement aéronautique ou aérospatial, et plus particulièrement pour les éléments soumis à des contraintes mécaniques en service tels que pompes à métal liquide et roulements magnétiques. Ils sont encore utilisés pour la fabrication de pièces polaires pour électro-aimants.

2.7 Classe G – Autres alliages

2.7.1 Classe G.1 – Alliages fer-aluminium

2.7.1.1 Généralités

Ces matériaux ne sont pas couverts par une publication CEI.

2.7.1.1.1 Composition chimique

Les constituants de base de ces matériaux sont le fer et l'aluminium, la teneur en aluminium étant comprise entre 12 % et 16 %, des impuretés inévitables étant aussi présentes. Ces matériaux peuvent contenir des additions de chrome ou de rhénium pour améliorer les propriétés magnétiques de l'alliage.

2.7.1.1.2 Base de sous-classification

La base de sous-classification recommandée est la teneur en aluminium.

2.7.1.1.3 Modes de présentation

Les matériaux sont normalement livrés sous forme de barres, de bandes ou de tôles laminées à chaud, d'éléments de structure moulés ou frittés.

Magnetic measurements are made in accordance with either IEC 60404-4 or IEC 60404-6, according to product form.

Specified values for the magnetic properties of finally annealed material are given in table 31.

Table 31 – Specified magnetic properties

Grade		Maximum coercivity	Minimum magnetic polarization at $H =$	
			4 000 A/m	8 000 A/m
		A/m	T	
F 31	Bulk material	300	1,1	1,75
	Strip or sheet		1,85	2,0

2.6.3.3 Main applications

These materials are mainly used for applications involving either extremely high magnetic polarizations or particularly high temperatures, such as for electromagnetic and electro-mechanical devices for aeronautical or aerospace equipment, especially when subjected to mechanical load in service such as liquid metal pumps and magnetic bearings. They are also used for pole pieces for electromagnets.

2.7 Class G – Other alloys

2.7.1 Class G.1 – Aluminium-iron alloys

2.7.1.1 General

These materials are not covered by an IEC publication.

2.7.1.1.1 Chemical composition

The basic constituents of these materials are iron and aluminium whose content may be between 12 % and 16 %, together with unavoidable impurities. These materials may contain additions of chromium and rhenium to improve the magnetic properties of the alloy.

2.7.1.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the aluminium content.

2.7.1.1.3 Available forms

The materials are normally supplied in the form of hot-rolled bars, strips and sheets or cast or sintered structural parts.

2.7.1.2 Caractéristiques physiques

Outre la teneur en aluminium, une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: perméabilité initiale et maximale, coercitivité, polarisation magnétique de saturation, magnétostriction;
- mécaniques: dureté, aptitude au poinçonnage, état de surface;
- état métallurgique: laminé à chaud, moulé, fritté;
- dimensions: épaisseur, (si requis) largeur, diamètre.

2.7.1.3 Applications principales

Les matériaux sont utilisés pour la fabrication de noyaux feuilletés pour têtes magnétiques et transducteurs ultrasonores ou en tant qu'éléments de structure de circuits magnétiques.

2.7.2 Classe G.2 – Alliages fer-aluminium-silicium

2.7.2.1 Généralités

Ces matériaux ne sont pas couverts par une publication CEI.

2.7.2.1.1 Composition chimique

Les constituants de base de ces matériaux sont le fer, l'aluminium dont la teneur peut être comprise entre 5 % et 6,5 % et le silicium dont la teneur peut être comprise entre 7 % et 9,5 %, ainsi que des impuretés inévitables. Ces alliages peuvent contenir des additions de titane, de cérium, de niobium et de vanadium pour améliorer les propriétés magnétiques et mécaniques.

2.7.2.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est fondée sur la perméabilité initiale.

2.7.2.1.3 Modes de présentation

Les matériaux sont normalement fournis sous forme de pièces moulées ou de produits semi-finis, par exemple des poudres.

2.7.2.2 Caractéristiques physiques

En plus de la perméabilité initiale, une définition plus complète peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: polarisation magnétique de saturation, coercitivité, perméabilité initiale, perméabilité maximale;
- électriques: résistivité;
- mécanique: dureté;
- état métallurgique: brut de coulée;
- dimensions: déterminées par l'application.

2.7.2.3 Applications principales

Les matériaux sont utilisés pour certaines parties de circuits magnétiques, de têtes magnétiques, et sous forme de produits semi-finis, par exemple des poudres.

2.7.1.2 Physical characteristics

In addition to aluminium content, a more complete definition of the materials can be based on the following properties:

- magnetic: initial and maximum permeability, coercivity, saturation magnetic polarization, magnetostriction;
- mechanical: hardness, suitability for punching operations, surface condition;
- metallurgical state: hot-rolled, cast, sintered;
- dimensions: thickness, width (as required), diameter.

2.7.1.3 Main applications

The materials are used in the manufacture of laminated cores for magnetic heads and ultrasonic transducers or as structural parts of magnetic circuits.

2.7.2 Class G.2 – Aluminium-silicon-iron alloys

2.7.2.1 General

These materials are not covered by an IEC publication.

2.7.2.1.1 Chemical composition

The basic constituents of these materials are iron, aluminium, the content of which may be between 5 % to 6,5 %, and silicon, the content of which may be between 7 % and 9,5 %, together with unavoidable impurities. These alloys may contain additions of titanium, cerium, niobium and vanadium to improve magnetic and mechanical properties.

2.7.2.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the initial permeability.

2.7.2.1.3 Available forms

The materials are normally supplied in the form of castings or of semi-processed products, for example, powder.

2.7.2.2 Physical characteristics

In addition to the initial permeability, a more complete definition of the materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: saturation magnetic polarization, coercivity, initial permeability, maximum permeability;
- electrical: resistivity;
- mechanical: hardness;
- metallurgical state: as cast;
- dimensions: determined by application.

2.7.2.3 Main applications

The materials are used for the parts of magnetic circuits, magnetic heads and as semi-processed products, for example, powder.

2.8 Classe H – Matériaux magnétiques doux obtenus par les techniques de la métallurgie des poudres

2.8.1 Classe H.1 – Ferrites doux

2.8.1.1 Généralités

Ces matériaux sont couverts par la CEI 60401.

2.8.1.1.1 Composition chimique

La majorité des ferrites doux disponibles commercialement sont des céramiques polycristallines ayant une structure cristalline cubique et une formule de type MFe_2O_4 où M représente un ou plusieurs métaux divalents de transition. Dans les matériaux les plus courants, M est une combinaison soit de manganèse et de zinc, soit de nickel et de zinc.

2.8.1.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est fondée sur la perméabilité initiale.

2.8.1.1.3 Modes de présentation

Les ferrites magnétiques doux sont généralement livrés sous forme de composants magnétiques pour lesquels les matières premières sont transformées en poudre, laquelle subit la mise en forme requise, un frittage et une finition mécanique. Une très petite proportion seulement est fournie comme matériau sous forme de poudre magnétique (frittée complètement).

NOTE Des poudres prêtes à l'emploi pour la production des composants ne sont pas considérées comme matériaux ferrites pour les besoins de cette classification.

2.8.1.2 Caractéristiques physiques

Une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

NOTE Lorsqu'on cite des valeurs pour les matériaux, celles-ci sont normalement mesurées sur des tores de dimensions données et il convient de noter que des caractéristiques identiques ne peuvent pas toujours être réalisées sur un composant de géométrie différente.

- magnétiques: perméabilité initiale, pertes totales spécifiques en fonction de la fréquence, pertes par hystérésis en fonction de la polarisation magnétique, variations de la perméabilité en fonction de la température, facteur de désaccommodation, polarisation magnétique pour différentes valeurs d'intensité du champ magnétique, coercitivité;
- thermiques: point de Curie;
- électriques: résistivité;
- formes: tiges, tubes, goupilles, noyaux spiralés, noyaux bobines, noyaux toroïdaux, noyaux EP, RM et E.

Des gammes types des caractéristiques de ferrites Mn-Zn et Ni-Zn sont données dans les tableaux 32 et 33.

2.8 Class H – Magnetically soft materials made by powder metallurgical techniques

2.8.1 Class H.1 – Soft ferrites

2.8.1.1 General

These materials are covered by IEC 60401.

2.8.1.1.1 Chemical composition

The majority of commercially available soft ferrites are polycrystalline ceramics having a cubic crystal structure and a typical formula MFe_2O_4 where M usually represents one or more of the divalent transition metals. In the most common materials, M is either a combination of manganese and zinc, or of nickel and zinc.

2.8.1.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the initial permeability.

2.8.1.1.3 Available forms

Magnetically soft ceramics are generally supplied in the form of magnetic components, for which the raw materials are made into powder, formed to the required shape, sintered and mechanically finished. Only a very small proportion is supplied as a material in the form of a (fully sintered) magnetic powder.

NOTE Calcined powders for component production should not be considered as ferrite material for the purpose of this classification.

2.8.1.2 Physical characteristics

A more complete definition of these materials may be based on the following characteristics:

NOTE Where material values are quoted, these are normally measured on ring cores of stated dimensions and it should be noted that identical characteristics cannot always be realized on a component of differing geometry.

- magnetic: initial permeability, specific total loss as a function of frequency, hysteresis loss as a function of magnetic polarization, temperature dependence of permeability, disaccommodation factor, magnetic polarization at various values of magnetic field strength, coercivity;
- thermal: Curie temperature;
- electrical: resistivity;
- shapes: rods, tubes, pins, screw and bobbin cores, ring cores, pot cores, EP, RM and E cores.

Typical ranges of properties for the Mn-Zn- and the Ni-Zn-ferrites are given in tables 32 and 33.

Tableau 32 – Caractéristiques types des ferrites Mn-Zn

Perméabilité initiale	Facteur relatif de perte pour $f = 50 \text{ kHz}$	Constante d'hystérésis du matériau	Coefficient de température de la perméabilité*	Désaccommodation à 40°C	Polarisation magnétique pour $H = 1\,000 \text{ A/m}$	Température de Curie	Résistivité
	10^{-6}	T^{-1}	$10^{-6}/\text{K}$	10^{-6}	mT	K	Ωm
700 à 10 000	1 à 20	0,8 à 2	0 à 8	2 à 10	300 à 480	390 à 470	0,05 à 5

* Entre 20°C et 55°C .

Tableau 33 – Caractéristiques types des ferrites Ni-Zn

Perméabilité initiale	Facteur relatif de perte pour $f = 50 \text{ MHz}$	Constante d'hystérésis du matériau	Coefficient de température de la perméabilité*	Désaccommodation à 40°C	Polarisation magnétique pour $H = 3\,000 \text{ A/m}$	Température de Curie	Résistivité
	10^{-6}	T^{-1}	$10^{-6}/\text{K}$	10^{-6}	mT	K	Ωm
10 à 250	100 à 400	10 à 40	0 à 30	<60	50 à 400	520 à 770	10^3 à 10^7

* Entre 20°C et 55°C .

Les propriétés dépendent fortement de la composition exacte du matériau, c'est-à-dire des ions métalliques et de leur proportion. Le traitement thermique, y compris l'atmosphère et la vitesse de refroidissement, sont des facteurs critiques pour l'obtention des propriétés.

La variation d'une propriété influence normalement les différentes autres propriétés. Cette situation donne lieu à l'existence de nombreux matériaux différents, chacun destiné à un groupe relativement restreint d'applications.

2.8.1.3 Applications principales

Parmi les applications les plus importantes, on peut citer les suivantes:

- noyaux pour inductances et transformateurs travaillant aux fréquences dans la gamme allant des fréquences acoustiques à plusieurs centaines de mégahertz;
- noyaux pour transformateurs d'impulsions jusqu'à plusieurs centaines de mégahertz;
- joncs d'antenne;
- noyaux pour transformateurs de puissance travaillant à des fréquences dans la gamme allant de 5 kHz à environ 30 MHz;
- noyaux toroïdaux et noyaux à plusieurs ouvertures pour les dispositifs de mémoire;
- noyaux pour têtes d'enregistrement;
- noyaux pour bobines de déflexion pour tube cathodique;
- noyaux pour dispositifs pour hyperfréquences réciproques et non réciproques;
- perles pour découplage aux fréquences radioélectriques et affaiblissement des signaux parasites.

Table 32 – Typical properties for Mn-Zn ferrites

Initial permeability	Relative loss factor at $f = 50$ kHz	Hysteresis material constant	Temperature coefficient of permeability*	Disaccommodation at 40 °C	Magnetic polarization at $H = 1\,000$ A/m	Curie temperature	Resistivity
	10^{-6}	T^{-1}	$10^{-6}/K$	10^{-6}	mT	K	Ωm
700 to 10 000	1 to 20	0,8 to 2	0 to 8	2 to 10	300 to 480	390 to 470	0,05 to 5

* Between 20 °C and 55 °C.

Table 33 – Typical properties for Ni-Zn ferrites

Initial permeability	Relative loss factor at $f = 10$ MHz	Hysteresis material constant	Temperature coefficient of permeability*	Disaccommodation at 40 °C	Magnetic polarization at $H = 3\,000$ A/m	Curie temperature	Resistivity
	10^{-6}	T^{-1}	$10^{-6}/K$	10^{-6}	mT	K	Ωm
10 to 250	100 to 400	10 to 40	0 to 30	<60	50 to 400	520 to 770	10^3 to 10^7

* Between 20 °C and 55 °C.

The properties depend strongly on the exact composition of the materials, i.e. the metal ions and their proportion. The heat treatment including atmosphere and cooling rate are critical factors in developing the properties.

Variation of one property normally influences the value of various other properties. This situation gives rise to the existence of many separate materials, each intended for a relatively small group of applications.

2.8.1.3 Main applications

Among the most important applications are the following:

- cores for inductors and transformers operating at frequencies in the range from audio frequency to several hundreds of megahertz;
- cores for pulse transformers up to several hundred megahertz;
- aerial rods;
- cores for power transformers operating at frequencies in the range from about 5 kHz to about 30 MHz;
- ring cores and multiaperture cores for data storage devices;
- cores for recording heads;
- cores for deflection coils on cathode-ray tubes;
- cores for reciprocal and non-reciprocal microwave devices;
- beads for RF decoupling and attenuation of unwanted signals.

2.8.2 Classe H.2 – Matériaux magnétiques doux frittés

2.8.2.1 Généralités

Ces matériaux sont couverts par la CEI 60404-8-9.

2.8.2.1.1 Composition chimique et méthode de fabrication

Les matériaux magnétiques doux frittés sont produits par la technique de la métallurgie des poudres (MP). Cette technologie de fabrication permet la fabrication économique d'éléments de structure. Un traitement thermique additionnel est nécessaire si ces éléments doivent être usinés pour maintenir les tolérances prescrites ou pour obtenir la forme finale.

Outre le fer pur, des alliages FeP contenant de 0,3 % à 0,8 % de P, des alliages FeNi contenant de 30 % à 85 % de Ni, des alliages FeCo contenant de 40 % à 55 % de Co et des alliages FeSi contenant de 0,3 % à 3,5 % de Si sont courants.

2.8.2.1.2 Base de sous-classification

Pour chaque alliage, la sous-classification recommandée est fondée sur la coercitivité.

2.8.2.1.3 Mode de présentation

Les matériaux magnétiques doux frittés sont généralement livrés sous forme d'éléments de structure.

2.8.2.2 Caractéristiques physiques

Une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: polarisation magnétique pour une valeur donnée de l'intensité du champ magnétique, polarisation magnétique de saturation, perméabilité maximale;
- mécaniques: masse volumique, porosité, dureté;
- électriques: résistivité.

Les caractéristiques physiques et magnétiques sont données dans les tableaux 34 et 35.

Tableau 34 – Gammes des caractéristiques spécifiées

Matériau	Masse volumique minimale	Coercitivité maximale
	kg/m ³	A/m
Fe	6 400 à 7 300	150 à 175 ¹⁾
FeP	6 800 à 7 300	110 à 150 ¹⁾
FeNi	7 600 à 8 300	8 à 20
FeCo	7 700	100 à 200
FeSi	7 200 à 7 400	50 à 80
1) Avec des précautions particulières, des coercitivités plus basses sont possibles.		

2.8.2 Class H.2 – Magnetically soft sintered materials

2.8.2.1 General

These materials are covered by IEC 60404-8-9.

2.8.2.1.1 Chemical composition and manufacturing method

Magnetically soft sintered materials are produced by the powder metallurgical (PM) technique. This manufacturing technology allows the economical manufacture of structural parts. An additional heat treatment is necessary if the structural parts have to be machined to keep the prescribed tolerances or to complete the final shape.

Besides plain iron FeP-alloys containing 0,3 % to 0,8 % P, FeNi-alloys containing 30 % to 85 % Ni, FeCo-alloys containing 40 % to 55 % Co and FeSi-alloys containing 0,3 % to 3,5 % Si are usual.

2.8.2.1.2 Basis of subclassification

For each alloy the recommended subclassification is based on the coercivity.

2.8.2.1.3 Available forms

Magnetically soft sintered materials are generally supplied as structural parts.

2.8.2.2 Physical characteristics

A more complete definition of these materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: magnetic polarization at a given magnetic field strength, saturation magnetic polarization, maximum permeability;
- mechanical: density, porosity, hardness;
- electrical: resistivity

Physical and magnetic properties are given in tables 34 and 35.

Table 34 – Ranges of specified properties

Material	Minimum density	Maximum coercivity
	kg/m ³	A/m
Fe	6 400 to 7 300	150 to 175 ¹⁾
FeP	6 800 to 7 300	110 to 150 ¹⁾
FeNi	7 600 to 8 300	8 to 20
FeCo	7 700	100 to 200
FeSi	7 200 to 7 400	50 to 80
1) With special precautions, lower coercivities are possible.		

Tableau 35 – Caractéristiques physiques et magnétiques types

Matériau	Porosité	Polarisation magnétique pour $H = 500 \text{ A/m}$	Polarisation magnétique pour $H = 80\,000 \text{ A/m}$	Valeur minimale de la perméabilité relative maximale	Dureté Vickers	Résistivité
	%	T	T		HV5	$\mu\Omega\text{m}$
Fe	6 à 16	0,7 à 1,3	1,55 à 1,85	2 000 à 5 500	50 à 70	0,12 à 0,15
FeP	5 à 10	1,05 à 1,35	1,65 à 1,85	3 400 à 6 900	95 à 105	0,18 à 0,20
FeNi	3 à 7	0,75 à 1,30	0,80 à 1,55	20 000 à 74 500	70 à 95	0,45 à 0,60
FeCo	3	1,50 à 1,55	2,15 à 2,20	2 000 à 3 900	190 à 240	0,10 à 0,35
FeSi	2 à 4	1,35 à 1,40	1,85 à 1,95	8 000 à 9 500	170 à 180	0,45

2.8.2.3 Application principale

Les matériaux sont utilisés comme éléments de structure de circuits magnétiques.

2.8.3 Classe H.3 – Poudres composites

2.8.3.1 Généralités

Ces matériaux ne sont pas couverts par une publication CEI.

2.8.3.1.1 Composition chimique et méthode de fabrication

Les matériaux de poudre composite consistent en une poudre magnétique de base et des additifs et liants isolants électriques, organiques ou inorganiques.

Les poudres composites de fer pur (Fe), de fer-silicium (FeSi, FeSiAl), et de fer-nickel (FeNi, FeNiMo) sont utilisées. Les techniques de la métallurgie des poudres telles que la compression isostatique à froid, la compression en coquille ou le moulage par injection sont utilisées pour la fabrication.

2.8.3.1.2 Base de sous-classification

Pour chaque matériau, la sous-classification recommandée est fondée sur la perméabilité initiale. Une base possible de sous-classification est la composition des éléments d'alliage.

2.8.3.1.3 Modes de présentation

Les matériaux en poudre composite sont livrés sous forme d'éléments de structure (noyaux en poudre) ou d'ébauches comprimées isostatiquement à froid. Dans le cas de composites à liant organique, une mise en forme par usinage est possible.

2.8.3.2 Caractéristiques physiques

Une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: perméabilité initiale, polarisation magnétique de saturation, densité des pertes totales;
- mécaniques: masse volumique;
- électriques: résistivité.

Table 35 – Typical physical and magnetic properties

Material	Porosity	Magnetic polarization at $H = 500 \text{ A/m}$	Magnetic polarization at $H = 80\,000 \text{ A/m}$	Maximum relative permeability minimum value	Vickers hardness	Resistivity
	%	T	T		HV5	$\mu\Omega\text{m}$
Fe	6 to 16	0,7 to 1,3	1,55 to 1,85	2 000 to 5 500	50 to 70	0,12 to 0,15
FeP	5 to 10	1,05 to 1,35	1,65 to 1,85	3 400 to 6 900	95 to 105	0,18 to 0,20
FeNi	3 to 7	0,75 to 1,30	0,80 to 1,55	20 000 to 74 500	70 to 95	0,45 to 0,60
FeCo	3	1,50 to 1,55	2,15 to 2,20	2 000 to 3 900	190 to 240	0,10 to 0,35
FeSi	2 to 4	1,35 to 1,40	1,85 to 1,95	8 000 to 9 500	170 to 180	0,45

2.8.2.3 Main application

The materials are used as structural parts in magnetic circuits.

2.8.3 Class H.3 – Powder composites**2.8.3.1 General**

These materials are not covered by an IEC publication.

2.8.3.1.1 Chemical composition and manufacturing method

Powder composite materials consist of a basic magnetic powder and inorganic or organic electrically insulating additives and binders.

Pure iron (Fe), iron-silicon (FeSi, FeSiAl) and nickel-iron (FeNi, FeNiMo) powder composites are in use. Powder metallurgical techniques such as cold-isostatic pressing, die pressing or injection moulding are used for manufacturing.

2.8.3.1.2 Basis of subclassification

For each material the recommended subclassification is based on the initial permeability. A possible basis of subclassification is the composition of the alloying elements.

2.8.3.1.3 Available forms

Powder composite materials are supplied as structural parts (powder cores) or cold isostatic pressed blanks. In the case of organic bound composites, shaping by machining is possible.

2.8.3.2 Physical characteristics

A more complete definition of these materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: initial permeability, saturation magnetic polarization, total loss density;
- mechanical: density;
- electrical: resistivity.

Des valeurs types des caractéristiques physiques et magnétiques sont données dans le tableau 36.

Tableau 36 – Caractéristiques physiques et magnétiques types

Matériau	Perméabilité magnétique initiale	Polarisation magnétique de saturation	Densité de pertes totales pour $J = 0,1$ T et $f = 1$ kHz	Résistivité électrique
		T	W/m ³	Ωm
Base Fer	10 à 90	0,5 à 2,0	10 à 35	1 à 10 ⁶
Base FeNi	10 à 500	0,5 à 1,5	3 à 15	1 à 10 ⁶

2.8.3.3 Application principale

Les matériaux sont utilisés comme noyaux en forme de tore pour des composants inductifs (dispositifs de mémoire) et comme éléments de structure de moteurs.

2.9 Classe I – Matériaux magnétiques doux amorphes

Les alliages amorphes sont des matériaux non cristallins qui sont produits par une solidification rapide réalisée par moulage en tôles minces ou fils. Dû au manque d'un ordonnancement atomique complet, ils n'ont aucune anisotropie magnéto-cristalline. Des caractéristiques magnétiques douces intéressantes ont été trouvées dans les alliages à base fer avec une polarisation magnétique de saturation relativement élevée et dans les alliages à base cobalt avec presque aucune magnétostriction.

2.9.1 Classe I.1 – Alliages à base fer

2.9.1.1 Généralités

Ces matériaux ne sont pas couverts par une publication CEI.

2.9.1.1.1 Composition chimique

Les constituants de base de ces matériaux sont le fer et les métalloïdes (principalement le silicium et le bore), dans une teneur habituellement comprise entre 16 % et 30 % en nombre d'atomes. Ces alliages peuvent de plus contenir des additions de titane, vanadium, chrome, zirconium, niobium ou molybdène afin d'accroître leurs caractéristiques magnétiques et mécaniques. Une partie du fer peut être substituée par du nickel ou du cobalt.

2.9.1.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est fondée sur la polarisation magnétique de saturation et la forme du cycle d'hystérésis.

2.9.1.1.3 Modes de présentation

Les matériaux sont normalement livrés sous forme de rubans minces solidifiés rapidement, d'épaisseur type de 20 µm à 50 µm, et sous forme de noyaux fabriqués à partir de ruban enroulé.

Typical values for physical and magnetic properties are given in table 36.

Table 36 – Typical physical and magnetic properties

Material	Initial magnetic permeability	Saturation magnetic polarization	Total loss density at $J = 0,1$ T and $f = 1$ kHz	Electrical resistivity
		T	W/m ³	Ωm
Fe-base	10 to 90	0,5 to 2,0	10 to 35	1 to 10 ⁶
FeNi-base	10 to 500	0,5 to 1,5	3 to 15	1 to 10 ⁶

2.8.3.3 Main application

The materials are used as ring-shaped powder cores for inductive components (storage chokes) and as structural parts in motor applications.

2.9 Class I – Amorphous soft magnetic materials

Amorphous alloys are non-crystalline materials which are produced via rapid solidification by casting as thin sheets or wires. Due to the lack of long-range atomic order, they have no magneto-crystalline anisotropy. Interesting soft magnetic properties are found in Fe-based alloys with relatively high saturation magnetic polarization and in Co-based alloys with near-zero magnetostriction.

2.9.1 Class I.1 – Iron-based alloys

2.9.1.1 General

These materials are not covered by an IEC publication.

2.9.1.1.1 Chemical composition

The basic constituents of these materials are iron and metalloids (mainly silicon and boron) the content of which is commonly in the range of 16 % by atoms to 30 % by atoms. These alloys may further contain additions of titanium, vanadium, chromium, zirconium, niobium or molybdenum to improve magnetic and mechanical properties. Part of the iron may be substituted by nickel or cobalt.

2.9.1.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the saturation magnetic polarization and the shape of the hysteresis loop.

2.9.1.1.3 Available forms

The materials are normally supplied in the form of rapidly solidified thin ribbons of typical thickness 20 µm to 50 µm and in the form of tape wound cores.

2.9.1.2 Caractéristiques physiques

Une définition plus complète des matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: pertes totales spécifiques en fonction de la polarisation magnétique et de la fréquence, puissance apparente spécifique, polarisation magnétique de saturation, magnétostriction, coercitivité, perméabilité initiale, perméabilité réversible pour différentes valeurs d'intensité du champ magnétique, forme carrée du cycle $B-H$, rémanence magnétique;
- électriques: résistivité;
- thermiques: température de Curie, température de cristallisation;
- dimensions: épaisseur, largeur;
- mécaniques: ductilité, facteur de foisonnement;
- état métallurgique: état semi-fini c'est-à-dire brut de coulée. Les propriétés magnétiques sont développées par un traitement thermique dans un champ magnétique.

Les propriétés dépendent fortement de la composition exacte du matériau et du traitement thermique.

Les caractéristiques physiques et magnétiques types après traitement thermique sont données dans le tableau 37.

Tableau 37 – Caractéristiques physiques et magnétiques types

Matériau	Pertes totales spécifiques pour $J = 1,4$ T et $f = 50$ Hz	Puissance apparente spécifique pour $J = 1,4$ T et $f = 50$ Hz	Coercitivité	Polarisation magnétique pour $H = 800$ A/m	Température de cristallisation	Résistivité	Masse volumique	Facteur de foisonnement
	W/kg	VA/kg	A/m	T	°C	$\mu\Omega\text{m}$	kg/m ³	%
Fe ₉₂ Si ₅ B ₃	0,2	1,0	3	1,55	550	1,2	7 200	80 à 85

2.9.1.3 Applications principales

La variation d'une propriété influe normalement sur la valeur des diverses autres propriétés. Cette situation conduit à l'existence de nombreux matériaux différents, chacun étant destiné à un groupe relativement réduit d'applications.

Les plus importantes sont

- les noyaux pour les transformateurs de distribution aux fréquences industrielles,
- les noyaux pour inducteurs et transformateurs opérant à des fréquences jusqu'à plusieurs centaines de kHz, et
- les agrafes de détecteur de vol.

2.9.2 Classe I.2 – Alliages à base cobalt

2.9.2.1 Généralités

Ces matériaux ne sont pas couverts par une publication CEI.

2.9.1.2 Physical characteristics

A more complete definition of the materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: specific total loss as a function of magnetic polarization and frequency, specific apparent power, saturation magnetic polarization, magnetostriction, coercivity, initial permeability, reversible permeability at various values of magnetic field strength, squareness of the B - H loop, remanence;
- electrical: resistivity;
- thermal: Curie temperature, crystallization temperature;
- dimensions: thickness, width;
- mechanical: ductility, stacking factor;
- metallurgical state: semi-processed state, i.e. as cast. The magnetic properties are developed by the heat treatment in a magnetic field.

The properties depend strongly on the exact composition of the material and on the heat treatment.

Typical physical and magnetic properties after heat treatment are given in table 37.

Table 37 – Typical physical and magnetic properties

Material	Specific total loss at $J = 1,4$ T and $f = 50$ Hz	Specific apparent power at $J = 1,4$ T and $f = 50$ Hz	Coercivity	Magnetic polarization at $H = 800$ A/m	Crystallization temperature	Resistivity	Density	Stacking factor
	W/kg	VA/kg	A/m	T	°C	$\mu\Omega\text{m}$	kg/m ³	%
Fe ₉₂ Si ₅ B ₃	0,2	1,0	3	1,55	550	1,2	7 200	80 to 85

2.9.1.3 Main applications

Variation of one property normally influences the value of various other properties. This situation gives rise to the existence of many different materials, each intended for a relatively small group of applications.

The most important ones are

- core material for distribution transformers at power frequency,
- cores for inductors and transformers operating at frequencies up to several hundred kHz, and
- theft detection tags.

2.9.2 Class I.2 – Cobalt-based alloys

2.9.2.1 General

These materials are not covered by an IEC publication.

2.9.2.1.1 Composition chimique

Les constituants de base de ces matériaux sont le cobalt et le fer ou le manganèse dont la teneur est habituellement comprise entre 2 % et 10 % en nombre d'atomes et des métalloïdes (principalement le silicium et le bore) dont la teneur est comprise entre 18 % et 30 % en nombre d'atomes. Le cobalt peut être partiellement substitué par du nickel. Ces alliages peuvent contenir des additions de titane, vanadium, chrome, zirconium, niobium, molybdène, ruthénium, hafnium, tantale et tungstène afin d'accroître leurs propriétés magnétiques et mécaniques.

2.9.2.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est basée sur la polarisation magnétique de saturation et la forme du cycle d'hystérésis.

2.9.2.1.3 Modes de présentation

Les matériaux sont normalement livrés sous forme de bandes minces solidifiées rapidement avec des épaisseurs types de 15 μm à 50 μm et sous forme de noyaux de ruban enroulé.

2.9.2.2 Caractéristiques physiques

Une définition plus complète de ces matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: magnétostriction, perméabilité initiale, perméabilité réversible pour différentes valeurs d'intensité du champ magnétique, pertes totales spécifiques en fonction de la fréquence, forme carrée du cycle $B-H$, coercitivité;
- électriques: résistivité;
- thermiques: température de Curie, température de cristallisation;
- dimensions: épaisseur, largeur;
- état métallurgique: état semi-fin, c'est-à-dire brut de coulée.

Les propriétés dépendent fortement de la composition exacte du matériau et du traitement thermique. Certaines propriétés magnétiques peuvent être développées par un traitement thermique ultérieur avec ou sans champ magnétique.

2.9.2.3 Applications principales

La variation d'une propriété influe normalement sur la valeur de diverses autres propriétés. Cette situation conduit à l'existence de nombreux matériaux différents, chacun étant destiné à un groupe relativement réduit d'applications.

Les plus importantes sont

- noyaux pour inducteurs et transformateurs opérant à des fréquences allant de 50 Hz à plusieurs centaines de kHz;
- noyaux pour transformateurs d'impulsions;
- noyaux pour têtes magnétiques, et
- blindages magnétiques flexibles.

2.9.2.1.1 Chemical composition

The basic constituents of these materials are cobalt and iron or manganese whose content is commonly in the range of 2 % by atoms to 10 % by atoms and metalloids (silicon and boron mainly) whose content is in the range of 18 % by atoms to 30 % by atoms. Cobalt may be partly substituted by nickel. These alloys may contain additions of titanium, vanadium, chromium, zirconium, niobium, molybdenum, ruthenium, hafnium, tantalum and tungsten to improve magnetic and mechanical properties.

2.9.2.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the saturation magnetic polarization and the shape of the hysteresis loop.

2.9.2.1.3 Available forms

The materials are normally supplied in the form of rapidly solidified thin strips with a typical thickness of 15 µm to 50 µm and in the form of tape wound cores.

2.9.2.2 Physical characteristics

A more complete definition of the materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: magnetostriction, initial permeability, reversible permeability at various values of magnetic field strength, specific total loss as a function of frequency, squareness of the B - H loop, coercivity;
- electrical: resistivity;
- thermal: Curie temperature, crystallization temperature;
- dimensions: thickness, width;
- metallurgical state: semi-processed state, i.e. as cast.

The properties depend strongly on the exact composition of the material and on the heat treatment. Some magnetic properties can be developed by further heat treatment with or without a magnetic field.

2.9.2.3 Main applications

Variation of one property normally influences the value of various other properties. This situation gives rise to the existence of many different materials, each intended for a relatively small group of applications.

The most important ones are

- cores for inductors and transformers operating at frequencies in the range from 50 Hz to several hundreds of kHz,
- cores for pulse transformers,
- cores for recording heads, and
- flexible magnetic shielding.

2.9.3 Classe I.3 – Alliages à base nickel

2.9.3.1 Généralités

Ces matériaux ne sont pas couverts par une publication CEI.

2.9.3.1.1 Composition chimique

Les constituants métalliques de base de ces matériaux sont le nickel et le fer avec des teneurs en masse approximativement égales et formant environ 90 % en masse de l'alliage. Dans certains alliages, du molybdène peut être présent. Le principal métalloïde est le bore bien que le phosphore et le silicium puissent également être présents.

2.9.3.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification recommandée est basée sur la forme du cycle d'hystérésis.

2.9.3.1.3 Modes de présentation

Les matériaux sont normalement présentés sous forme de bandes minces solidifiées rapidement, avec des épaisseurs type de 15 μm à 50 μm .

2.9.3.2 Caractéristiques physiques

Une définition plus complète des matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: magnétostriction, perméabilité initiale, perméabilité réversible pour différentes valeurs d'intensité de champ magnétique, pertes totales spécifiques en fonction de la fréquence, forme carrée du cycle $B-H$, coercitivité, rapport d'atténuation de masque;
- électriques: résistivité;
- thermiques: point de Curie, température de recristallisation;
- dimensions: épaisseur, largeur;
- état métallurgique: à état semi-fini, c'est-à-dire brut de coulée.

Les propriétés dépendent fortement de la composition exacte du matériau et du traitement thermique. Certaines propriétés magnétiques peuvent être développées par un traitement thermique ultérieur avec ou sans champ magnétique.

2.9.3.3 Applications particulières

Les applications principales sont les éléments des détecteurs de surveillance et des masques magnétiques EMI.

3 Matériaux magnétiques durs (coercitivité $>1 \text{ kA/m}$)

3.1 Classe Q – Alliages magnétostrictifs – Alliages fer-terres rares (classe Q.1)

3.1.1 Généralités

Ces matériaux ne sont pas couverts par une publication CEI.

2.9.3 Class I.3 – Nickel-based alloys

2.9.3.1 General

These materials are not covered by an IEC publication.

2.9.3.1.1 Chemical composition

The basic metallic constituents of these materials are nickel and iron in approximately equal amounts by weight and which form about 90 % of the alloy by weight. In some alloys molybdenum can be present. The principal metalloid is boron although phosphorus and silicon can also be present.

2.9.3.1.2 Basis of subclassification

The recommended subclassification is based on the shape of the hysteresis loop.

2.9.3.1.3 Available forms

The materials are normally supplied in the form of rapidly solidified thin strips with a typical thickness of 15 µm to 50 µm.

2.9.3.2 Physical characteristics

A more complete definition of the materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: magnetostriction, initial permeability, reversible permeability at various values of magnetic field strength, specific total loss as a function of frequency, squareness of the $B-H$ loop, coercivity, shielding attenuation ratio;
- electrical: resistivity;
- thermal: Curie temperature, crystallization temperature;
- dimensions: thickness, width;
- metallurgical state: semi-processed state, i.e. as-cast.

The properties depend strongly on the exact composition of the material and on the heat treatment. Some magnetic properties can be developed by further heat treatment with or without a magnetic field.

2.9.3.3 Main applications

The main applications are for article surveillance sensors and magnetic EMI shielding.

3 Magnetically hard materials (coercivity >1 kA/m)

3.1 Class Q – Magnetostrictive alloys – Rare earth iron alloys (Class Q.1)

3.1.1 General

These materials are not covered by an IEC publication.

3.1.1.1 Composition chimique

Les constituants de base de ces matériaux sont le fer, le terbium et le dysprosium. Dans les composés $Tb_xDy_{(1-x)}Fe_y$, la valeur de x détermine le rapport Tb/Dy et y est le rapport Fe/(Tb + Dy). Les valeurs optimales de x sont proches de 0,3, valeur à laquelle une magnétostriction élevée est obtenue sans pertes d'hystérésis excessive. La valeur stoechiométrique pour $y = 2,0$ produit des propriétés optimales de magnétostriction mais les matériaux résultants sont très fragiles. Quand y décroît sous la valeur 2, le matériau devient moins fragile et la valeur de $y = 1,95$ constitue un bon compromis.

3.1.1.2 Base de sous-classification

Il n'y a pas de sous-classification reconnue.

3.1.1.3 Modes de présentation

Des barres à section circulaire, à grains orientés de différentes dimensions, sont disponibles et fabriquées selon les procédés de refusion en zone libre ou par le procédé Bridgeman modifié. L'axe du cylindre est la direction d'aimantation facile.

3.1.2 Caractéristiques physiques

Une définition plus complète des matériaux peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: contrainte de magnétostriction à saturation, point de Curie, facteur de couplage magnéto-élastique k_{33} , constante d ($d\lambda/dH$), perméabilité relative, impédance magnétique spécifique acoustique, densité d'énergie;
- mécaniques: masse volumique, module d'élasticité, vitesse du son, résistance à la traction, résistance à la compression;
- thermiques: coefficient de dilatation thermique;
- électriques: résistivité;
- état métallurgique: à grains orientés et traités thermiquement

L'usinabilité des matériaux est limitée en raison de leur fragilité. Les matériaux peuvent être meulés ou coupés par électro-érosion ou à l'aide d'un disque diamant.

Des caractéristiques physiques types à 20 °C pour le $Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,95}$ sont données dans le tableau 38.

Tableau 38 – Caractéristiques physiques types

Module d'élasticité pour $H =$		Vitesse du son pour $H =$		Résistance à la traction	Résistance à la compression	Déformation, magnéto-strictive à la saturation magnétique	Facteur de couplage	Point de Curie	Perméabilité relative pour $H = 80$ kA/m	
									Echantillon	
0	H_0 ¹⁾	0	H_0 ¹⁾						libre	bridé
10^4 N/mm ²		km/s		N/mm ²	N/mm ²	%		K		
2,65	5,50	1,69	2,45	28	700	0,15 à 0,20	0,72	660	9,3	4,5

¹⁾ H_0 : intensité du champ magnétique agissant, normalement $H_0 < 240$ kA/m.

3.1.1.1 Chemical composition

The basic constituents of these materials are iron, terbium and dysprosium. In $Tb_xDy_{(1-x)}Fe_y$ compounds, the value of x determines the Tb/Dy ratio and y is the Fe/(Tb+Dy) ratio. The optimum values of x are close to 0,3, where high magnetostriction is obtained without excessive hysteresis losses. The stoichiometric value for $y = 2,0$ produces optimum magnetostrictive properties but the resulting materials are very brittle. As y is decreased from 2, the material becomes less brittle and the value of $y = 1,95$ provides a good compromise.

3.1.1.2 Basis of subclassification

There is no recognized subclassification.

3.1.1.3 Available forms

Grain-oriented, round bars of different sizes are available manufactured by free stand zone melting or modified Bridgeman solidification processes. The cylinder axis is the easy direction of magnetization.

3.1.2 Physical characteristics

A more complete definition of the materials can be based on the following characteristics:

- magnetic: magnetostrictive strain at saturation, Curie temperature, magneto-elastic coupling factor k_{33} , d-constant ($d\lambda/dH$), relative permeability, magnetic specific acoustic impedance, energy density;
- mechanical: density, modulus of elasticity, sound speed, tensile strength, compressive strength;
- thermal: thermal expansion coefficient;
- electrical: resistivity;
- metallurgical state: grain-oriented and heat-treated

The machinability of the materials is limited due to their brittleness. The materials can be ground or cut by means of a spark cutter or a diamond wheel.

Typical physical properties at 20 °C for $Tb_{0,3}Dy_{0,7}Fe_{1,95}$ are given in table 38.

Table 38 – Typical physical properties

Modulus of elasticity at $H =$		Sound speed at $H =$		Tensile strength	Compressive strength	Magneto-strictive strain at magnetic saturation	Coupling factor	Curie temperature	Relative permeability at $H = 80 \text{ kA/m}$	
									Specimen	
0	$H_0^{1)}$	0	$H_0^{1)}$						Free	Clamped
10^4 N/mm^2		km/s		N/mm ²	N/mm ²	%		K		
2,65	5,50	1,69	2,45	28	700	0,15 to 0,20	0,72	660	9,3	4,5

¹⁾ H_0 : operating magnetic field strength, normally $H_0 < 240 \text{ kA/m}$.

3.1.3 Applications principales

Ces matériaux présentant un intérêt primordial dans les applications impliquant des forces importantes et des déplacements rapides et très précis à des niveaux de puissance élevés. De telles applications sont les émetteurs sonores à très forte puissance utilisées dans les sonars et les systèmes de défense, ainsi que pour la localisation des champs pétrolifères et les études océanographiques.

D'autres applications en cours de développement sont les éléments actifs d'application électromécanique.

3.2 Classe R – Alliages magnétiques durs

3.2.1 Classe R.1 – Alliages aluminium-nickel-cobalt-fer-titane

3.2.1.1 Généralités

Ces matériaux sont couverts par la CEI 60404-8-1.

3.2.1.1.1 Composition chimique et méthode de fabrication

Ces alliages comportent 6 % à 13 % d'aluminium, 13 % à 28 % de nickel, 0 % à 42 % de cobalt, 0 % à 9 % de titane, 2 % à 6 % de cuivre, le reste étant du fer. Ils peuvent contenir du silicium, du niobium ou d'autres éléments.

Ils sont obtenus par coulée ou par un procédé de métallurgie des poudres. Leurs caractéristiques magnétiques peuvent être accrues dans une direction préférentielle par application d'un champ magnétique au cours d'un traitement thermique, produisant ainsi une anisotropie magnétique. Les caractéristiques les plus avantageuses pour les aimants moulés sont obtenues à partir d'alliages avec une structure en colonnes ou monocristalline, le champ magnétique étant appliqué parallèlement à l'axe de la colonne.

3.2.1.1.2 Base de sous-classification

La sous-classification est fondée sur l'anisotropie magnétique et sur le procédé de fabrication.

3.2.1.1.3 Modes de présentation

Les aimants sont principalement présentés sous forme d'anneaux, de prismes, de cubes, de cylindres ou d'arcs de cercles. Les formes et dimensions possibles des aimants moulés à structure en colonnes ou monocristalline sont sujettes à certaines limitations.

3.2.1.2 Caractéristiques physiques

Outre le degré d'anisotropie et la méthode de fabrication, une définition plus complète peut être fondée sur les caractéristiques suivantes:

- magnétiques: maximum du produit BH , rémanence magnétique, coercitivité, perméabilité relative de recul;
- thermiques: coefficient de température pour la rémanence et la coercitivité et point de Curie;
- mécaniques: masse volumique, usinabilité;
- état métallurgique: moulé ou fritté et traité thermiquement;
- dimensions: déterminées par l'application.