

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Superconductivity –

Part 25: Mechanical properties measurement – Room temperature tensile test on REBCO wires

Supraconductivité –

Partie 25: Mesure des propriétés mécaniques – Essai de traction à température ambiante des fils REBCO

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-25:2018



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2018 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

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

IEC publications search - webstore.iec.ch/advsearchform

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 21 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

67 000 electrotechnical terminology entries in English and French extracted from the Terms and Definitions clause of IEC publications issued since 2002. Some entries have been collected from earlier publications of IEC TC 37, 77, 86 and CISPR.

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

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

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

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

Recherche de publications IEC - webstore.iec.ch/advsearchform

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 21 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

67 000 entrées terminologiques électrotechniques, en anglais et en français, extraites des articles Termes et Définitions des publications IEC parues depuis 2002. Plus certaines entrées antérieures extraites des publications des CE 37, 77, 86 et CISPR de l'IEC.

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Superconductivity –

Part 25: Mechanical properties measurement – Room temperature tensile test on REBCO wires

Supraconductivité –

Partie 25: Mesure des propriétés mécaniques – Essai de traction à température ambiante des fils REBCO

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 29.050; 77.040.10

ISBN 978-2-8322-5988-7

Warning! Make sure that you obtained this publication from an authorized distributor.
Attention! Veuillez vous assurer que vous avez obtenu cette publication via un distributeur agréé.

CONTENTS

FOREWORD.....	4
INTRODUCTION.....	6
1 Scope.....	7
2 Normative references	7
3 Terms and definitions	7
4 Principle	10
5 Apparatus.....	10
5.1 General.....	10
5.2 Testing machine	10
5.3 Extensometer.....	10
6 Specimen preparation.....	10
6.1 General.....	10
6.2 Length of specimen.....	10
6.3 Determination of cross-sectional area (S_0)	11
7 Testing conditions	11
7.1 Specimen gripping	11
7.2 Setting of extensometer	11
7.3 Testing speed	11
7.4 Test	11
8 Calculation of results	11
8.1 Modulus of elasticity (E).....	11
8.2 0,2 % proof strength ($R_{p0,2-0}$ and $R_{p0,2-U}$)	12
9 Uncertainty of measurement.....	12
10 Test report.....	13
10.1 Specimen.....	13
10.2 Results	13
Annex A (informative) Additional information relating to Clauses 1 to 10	14
A.1 General.....	14
A.2 Extensometer.....	14
A.2.1 Double extensometer.....	14
A.2.2 Single extensometer	16
A.3 Elastic limit	16
A.4 Gripping force	17
A.5 Percentage elongation after fracture (A_f).....	17
A.6 Condition of straining to fracture	17
A.7 Relative standard uncertainty (RSU)	17
A.8 Discretion applying this document.....	19
A.9 Assessment on the reliability of the test equipment.....	19
A.10 Additional information for test report	19
A.10.1 General	19
A.10.2 Test result	19
A.10.3 Test conditions	19
Annex B (informative) Evaluation of combined standard uncertainty for the modulus of elasticity	20
B.1 Model equation	20
B.2 Estimation of standard uncertainty	21

B.2.1	Precondition	21
B.2.2	Stress measurement.....	21
B.2.3	Size measurement.....	22
B.2.4	Strain measurement	23
B.2.5	Uncertainties on measurement of gauge length	24
B.3	Significant experimental factor	25
B.3.1	Initial strain rate [Osamura et al., 2014]	25
B.3.2	Thickness measurement [Osamura et al., 2014]	26
	Bibliography.....	27
	Figure 1 – Typical stress–strain curve and definition of moduli of elasticity and 0,2 % proof strengths.....	9
	Figure A.1 – Low-mass Siam twin type extensometer.....	14
	Figure A.2 – Low-mass double extensometer.....	15
	Figure A.3 – An example of the extensometer provided with balance weight and vertical specimen axis.....	16
	Figure B.1 – Strain rate dependence of the relative standard uncertainty given by Formula (B.6).....	25
	Figure B.2 – Relative standard uncertainty for the thickness measurement as a function of tape thickness.....	26
	Table A.1 – Relative standard uncertainty (X_{RSU}) and coefficient of variance ($X_{<COV>}$) for experimental data of E_0 and E_U	17
	Table A.2 – Relative standard uncertainty and coefficient of variance for experimental data of $R_{p0,2-0}$ and $R_{p0,2-U}$	18
	Table A.3 – Value of $X_{<COV>}$ for the data of the modulus of elasticity and the 0,2 % proof strength tested according to this document	19
	Table B.1 – Uncertainties for experimental variables in Formula (B.6).....	24
	Table B.2 – Summary of standard uncertainty evaluation, where the initial strain rate and the thickness were used as 3×10^{-4} /s and 0,1 mm, respectively.....	25

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

SUPERCONDUCTIVITY –**Part 25: Mechanical properties measurement –
Room temperature tensile test on REBCO wires****FOREWORD**

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

International Standard IEC 61788-25 has been prepared by IEC technical committee 90: Superconductivity.

The text of this International Standard is based on the following documents:

FDIS	Report on voting
90/404/FDIS	90/411/RVD

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

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

A list of all parts in the IEC 61788 series, published under the general title *Superconductivity*, can be found on the IEC website.

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

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

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-25:2018

INTRODUCTION

Several types of composite superconductors have now been commercialized. The rare-earth-based oxide superconductor (SC) with chemical formula $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ is used for practical SC wires, where the rare-earth element RE is typically Y, Dy, Gd, Nd, Ho or Sm, or a combination of two or more among them. This type of practical SC wire is usually called REBCO coated conductors. A typical architecture consists of a substrate of Ni-Cr-Mo based alloy, Ni-W alloy or stainless steel, a buffer layer consisting of a plurality of oxides, a SC layer and a protection layer of Ag. The substrate and buffer layer act as template to facilitate the well-oriented SC layer. In order to resist the large electromagnetic force, the wires are often externally reinforced by laminating thin stainless steel or Cu alloy foils. Commercial composite superconductors have a high current density and a small cross-sectional area. The major application of composite superconductors is to build electrical power devices and superconducting magnets. Complex stresses and strains are applied to the composite superconducting wires when devices are manufactured and energized. In the case of superconducting magnets, large electromagnetic forces are experienced by the windings due to the combination of high magnetic fields and high current density. It is therefore indispensable to determine the mechanical properties of the practical REBCO wires.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-25:2018

SUPERCONDUCTIVITY –

Part 25: Mechanical properties measurement – Room temperature tensile test on REBCO wires

1 Scope

This part of IEC 61788 specifies the test method and procedures for testing tensile mechanical properties of REBCO superconductive composite tapes at room temperature. This test is used to measure the modulus of elasticity and 0,2 % proof strength. The values for elastic limit, fracture strength and percentage elongation after fracture serve only as a reference. This document applies to samples having a rectangular cross-section with an area of 0,12 mm² to 6,0 mm² (corresponding to the tapes with width of 2,0 mm to 12,0 mm and thickness of 0,06 mm to 0,5 mm).

2 Normative references

The following documents are referred to in the text in such a way that some or all of their content constitutes requirements of this document. For dated references, only the edition cited applies. For undated references, the latest edition of the referenced document (including any amendments) applies.

ISO 376, *Metallic materials – Calibration of force-proving instruments used for the verification of uniaxial testing machines*

ISO 7500-1, *Metallic materials – Calibration and verification of static uniaxial testing machines – Part 1: Tension/compression testing machines – Calibration and verification of the force-measuring system*

ISO 9513, *Metallic materials – Calibration of extensometer systems used in uniaxial testing*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the following terms and definitions apply.

ISO and IEC maintain terminological databases for use in standardization at the following addresses:

- IEC Electropedia: available at <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: available at <http://www.iso.org/obp>

3.1

tensile stress

R

tensile force divided by the original cross-sectional area of the test piece at any moment during the test

3.2

tensile strain

A

displacement increment divided by initial gauge length of extensometers at any moment during the tensile test

3.3 extensometer gauge length

L_G

length of the parallel portion of the test piece used for the measurement of elongation by means of an extensometer

3.4 distance between grips

L_0

inward distance between grips that hold a test specimen in position before the test is started

3.5 modulus of elasticity

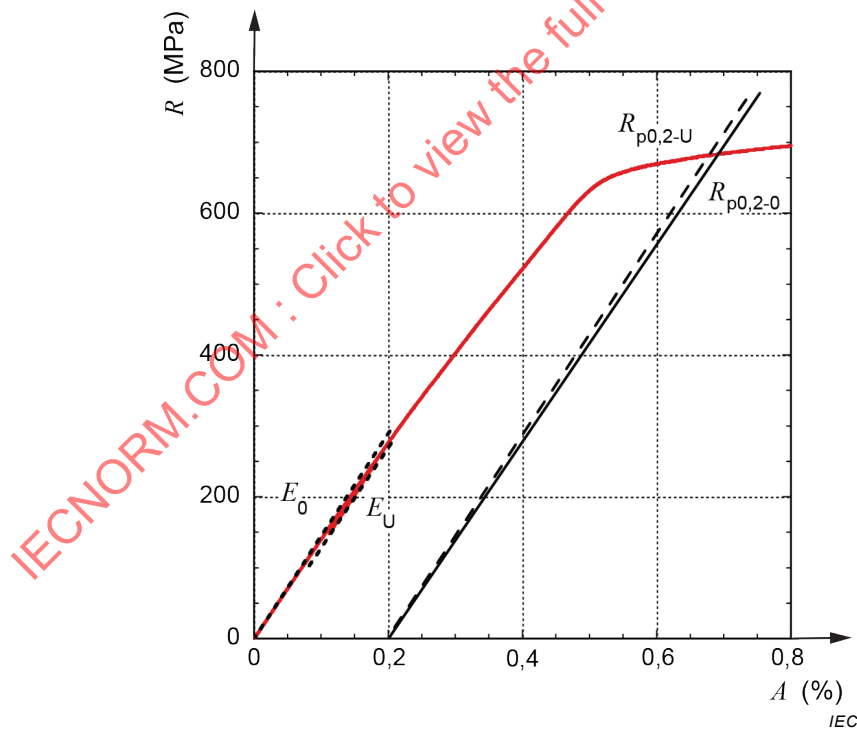
E

slope of the straight portion of the stress–strain curve in the elastic deformation region

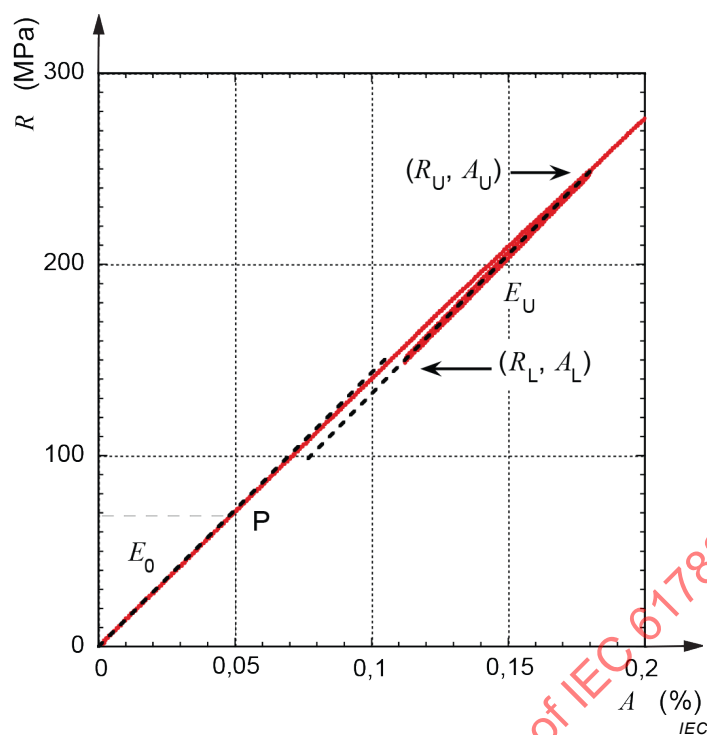
SEE: Figure 1

Note 1 to entry: The straight portion of the initial stress–strain curve is very narrow as indicated in Figure 1. To measure this quantity with a small standard uncertainty, the use of double extensometer systems will be an appropriate technique. In this sense, the quantity of E_U should be a representative data for the present text, while E_0 should be reported only when the measure is performed by means of double extensometer system.

Note 2 to entry: In the case of composite superconductor, however, it can be determined differently depending upon the adopted procedures; one from the initial loading curve by the zero offset line expressed as E_0 , the other one given by the slope of line during unloading, expressed as E_U . The dotted straight lines drawn along the initial loading curve and the unloading one in Figure 1 b) are only a guide to the eye for determining the slope.



a)



b)

The red curves are the observed data and the black continuous and black dotted straight lines are additional lines to indicate how to determine the moduli of elasticity and 0,2 % proof strengths.

Figure 1 – Typical stress–strain curve and definition of moduli of elasticity and 0,2 % proof strengths

3.6

0,2 % proof strength

$R_{p0,2}$

stress value where the superconductive composite wire yields by 0,2 %

SEE: Figure 1

3.7

fracture strength

R_f

tensile stress at the fracture

3.8

tensile stress at elastic limit

R_{el}

tensile force divided by the original cross-sectional area at the elastic limit corresponding to the transition from elastic to plastic deformation indicated by point P in Figure 1 b)

3.9

tensile strain at elastic limit

A_{el}

strain at the elastic limit corresponding to the transition from elastic to plastic deformation indicated by point P in Figure 1 b)

4 Principle

The test consists of straining a test piece by a tensile force, generally to fracture, for the purpose of determining the modulus of elasticity and 0,2 % proof strength described in Clause 1.

Depending on the employed strain measuring method, however, the quantities determined by the present test should be limited. When using the conventional single extensometer system, the determination of E_U and $R_{p0,2-U}$ is recommended. On the other hand, all E_0 , E_U , $R_{p0,2-0}$ and $R_{p0,2-U}$ can be determined by using double extensometer system, because of its capability to compensate the bending effects of the specimen and to guarantee a proper determination of the modulus of elasticity.

Additional information relating to Clauses 1 to 10 is given in Annex A.

5 Apparatus

5.1 General

The test machine and the extensometer shall conform to ISO 7500-1 and ISO 9513, respectively. The calibration shall obey ISO 376. The special requirement for this document is presented in 5.2 and 5.3.

5.2 Testing machine

A tensile machine control system that provides a constant cross head speed shall be used. Grips shall have a structure and strength appropriate for the test specimen and shall be constructed to provide a firm connection with the tensile machine. The faces of the grips shall be filed or knurled, or otherwise roughened, so that the test specimen will not slip during testing. Gripping may be a screw type, or pneumatically or hydraulically actuated.

5.3 Extensometer

The mass of the extensometer shall be 30 g or less, so as not to affect the mechanical properties of superconductive composite wires. The mass of the extensometers shall be balanced around the wire to avoid any non-alignment force. The generation of bending moments due to the non-alignment force shall be prevented (see Clause A.2).

6 Specimen preparation

6.1 General

Bending and/or pre-loading shall be prevented when the specimen is handled manually.

6.2 Length of specimen

The length of the test specimen shall be the sum of the inward distance between grips and the grip lengths. The minimum specimen length (L_{sm}) shall be calculated as,

$$L_{sm} = 2 \times L_g + L_G + 2 \times L_x \quad (1)$$

where L_g is the grip length, L_G is the gauge length of extensometer. L_x is the free gap distance between grip and extensometer and shall meet the condition,

$$L_x \geq 0,7 \times L_G \quad (2)$$

6.3 Determination of cross-sectional area (S_0)

A micrometer or other dimension-measuring apparatus shall be used to obtain the cross-sectional area of the specimen after the insulation coating has been removed. The cross-sectional area of tape-shaped wires shall be obtained from the product of its thickness and width.

7 Testing conditions

7.1 Specimen gripping

When the test specimen is mounted on the grips of the tensile machine, the test specimen and tensile loading axis shall be aligned to a straight line. Sand paper may be inserted as a cushioning material to prevent the gripped surfaces of the specimen from slipping and fracturing. During mounting of the sample, bending or deformation shall be prevented.

7.2 Setting of extensometer

When mounting the extensometer, deformation of the test specimen shall be prevented like the indentation due to extensometer's sharp edges which might cause an early fracture of the specimen. The extensometer shall be mounted at the centre between the grips, aligning the measurement direction with the specimen axis direction. During mounting, pre-loading the specimen shall be prevented. After installation, loading shall be physically zeroed.

7.3 Testing speed

The initial strain rate shall be slower than 10^{-4} s^{-1} during the test using the extensometer (see B.3.1).

7.4 Test

The tensile machine shall be started after the testing speed has been set to the specified level. The stress and strain calculated from the output signals of load cell and extensometer, respectively, shall be plotted on the ordinate and abscissa of the diagram as shown in Figure 1 a) and b). When the strain has reached a value between 0,1 % and 0,2 % as indicated A_U , the stress shall be reduced by approximately 30 % to 40 % of R_U to R_L . Then, the stress shall be increased again and the test should be continued to the point where the specimen is fractured.

Prior to the start of any material test programme, the test equipment shall be checked completely using similar size wires of known elastic properties (see Clause A.9).

8 Calculation of results

8.1 Modulus of elasticity (E)

Modulus of elasticity shall be calculated in general using the following formula and the straight portion of the initial loading curve and of the unloading one as shown in Figure 1 b). Appropriate software for data evaluation, with the function of enlargement of the stress-strain diagram especially around the region where the deviation from linearity is expected, should be used for post analyses of the plotted data.

$$E = \Delta F / (S_0 \Delta A) \quad (3)$$

where

E is the modulus of elasticity (GPa);

ΔF is the increment of the force (N);

ΔA is the increment of strain corresponding to ΔF ;

S_0 is the original cross-sectional area of the test specimen (mm²).

Since the unloading process is carried out at the strain indicated by the point A_U in Figure 1, the same Formula (3) is used for both the unloading modulus (E_U) and the initial loading one (E_0). It is recommended to measure the unloading curve at the starting point A_U , where A_U is recommended to be approximately 0,1 % to 0,2 %.

After the test, the results shall be examined using the ratio E_0/E_U . The ratio shall satisfy the condition as given in Formula (4) in which $\Delta = 0,2$ [Osamura et al., 2008 and 2014].

$$1 - \Delta < \frac{E_0}{E_U} < 1 + \Delta \quad (4)$$

When it does not satisfy the condition, the test is judged not to be valid. Then the test shall be repeated after checking the experimental procedure according to the present test method.

8.2 0,2 % proof strength ($R_{p0,2-0}$ and $R_{p0,2-U}$)

The 0,2 % proof strength of the composite is determined in two ways from the initial loading part and the unloading/reloading part of the stress–strain curve as shown in Figure 1.

The 0,2 % proof strength under loading $R_{p0,2-0}$ shall be determined as follows: the initial linear portion of the loading line of the stress–strain curve is moved to 0,2 % along the strain axis (0,2 % offset line under loading) and the point at which this linear line intersects the stress–strain curve shall be defined as the 0,2 % proof strength under loading.

The 0,2 % proof strength under unloading $R_{p0,2-U}$ shall be determined as follows: the initial linear portion under unloading is moved parallel to the 0,2 % offset strain point. The intersection of this line with the stress–strain curve determines the point that shall be defined as the 0,2 % proof strength under unloading.

Each 0,2 % proof strength shall be calculated using Formula (5):

$$R_{p0,2-i} = F_i / S_0 \quad (5)$$

where

$R_{p0,2-i}$ is the 0,2 % proof strength at each point (MPa);

F_i is the force at each point (N);

S_0 is the original cross-sectional area of the test specimen (mm²);

i indicates 0 or U.

9 Uncertainty of measurement

Unless otherwise specified, measurements shall be carried out in a temperature that can range from 285 K to 305 K. A force measuring cell with the relative standard uncertainty less than 0,1 %, valid between zero and the maximum force value shall be used. The extensometers should have the relative standard uncertainty of strain less than 0,5 %. The displacement measuring transducer (e.g. LVDT [linear variable differential transformer]) used for the calibration should have the relative standard uncertainty less than 0,1 %.

The value of relative standard uncertainty corresponding to the number of specimens tested of measured moduli of elasticity E_0 and E_U , proof strength $R_{p0,2-0}$ and $R_{p0,2-U}$ shall be calculated using Formula (6):

$$X_{RSU}(N) = X_{<COV>} / \sqrt{N} \quad (6)$$

where

$X_{RSU}(N)$ is the value of relative standard uncertainty;

N is the number of specimens tested;

$X_{<COV>}$ is the value of averaged coefficient of variation for all data tested.

According to the international round robin test (RRT, see Clause A.7), the parameter $X_{<COV>}$ has been evaluated as follows: 7,0 %, 4,6 %, 4,3 % and 4,1 % for E_0 , E_U , $R_{p0,2-0}$ and $R_{p0,2-U}$, respectively.

Evaluation of combined standard uncertainty for the modulus of elasticity is given in Annex B.

10 Test report

10.1 Specimen

- a) Name of the manufacturer of the specimen
- b) Classification and/or symbol
- c) Lot number
- d) Cross-sectional shape and dimension of the wire
- e) Materials comprising the substrate and stabilizer

10.2 Results

Results of the following mechanical properties shall be reported:

- a) Modulus of elasticity (E_0 and E_U)
- b) 0,2 % proof strengths ($R_{p0,2-0}$ and $R_{p0,2-U}$)

Annex A (informative)

Additional information relating to Clauses 1 to 10

A.1 General

This document is based on the axial stress–strain measurements at room temperature. Mechanical properties in the perpendicular orientation (c-axis) are also of importance in the manufacture of superconducting devices; they are not treated in this document. For wider strips, bi-axial stress–strain measurements done with bi-axial strain gauges are not uncommon but these measurements too are outside the scope of this document.

Annex A gives reference information on the variable factors that can seriously affect the tensile test method, together with some precautions to be observed when using this document.

A.2 Extensometer

A.2.1 Double extensometer

In the international RRT for REBCO tapes, a double extensometer system consisting of two single extensometers was generally used to record two signals to be averaged by software or one signal already averaged by the extensometer system itself.

Typical advanced low-mass double extensometers are shown in Figures A.1 and A.2.

Dimensions in millimetres

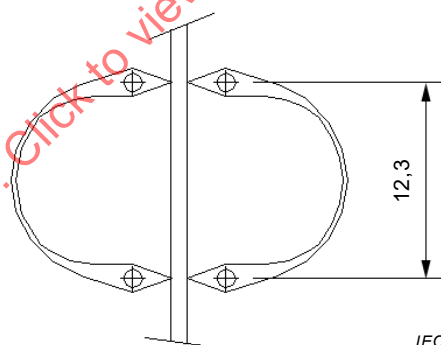


Figure A.1 – Low-mass Siam twin type extensometer

Figure A.1 shows a low-mass Siam twin type extensometer with a gauge length of 12,3 mm (total mass 0,5 g). The two extensometers are wired together into a single type extensometer, thus averaging the two displacement records electrically.

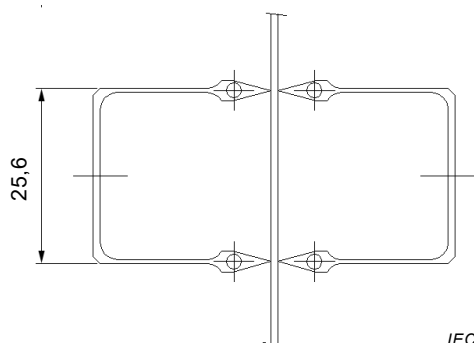
Dimensions in millimetres**Figure A.2 – Low-mass double extensometer**

Figure A.2 shows a low-mass double extensometer with a gauge length of 25,6 mm (total mass 3,0 g). Each of the two extensometers is a single type extensometer; the averaging should be carried out by software.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-25:2018

A.2.2 Single extensometer

Figure A.3 shows a single extensometer with total mass of 30 g together with a balance weight.

Dimensions in millimetres

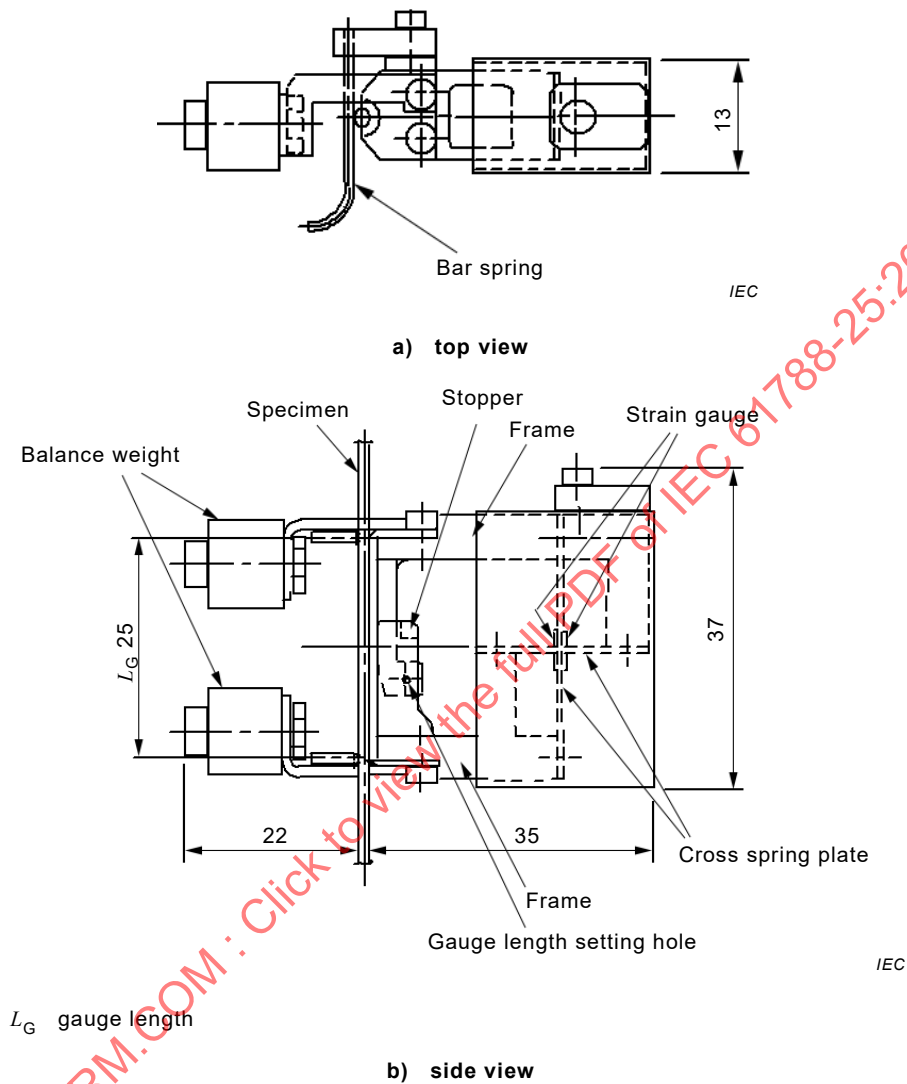


Figure A.3 – An example of the extensometer provided with balance weight and vertical specimen axis

A.3 Elastic limit

Figure 1 shows the result of tensile test at room temperature for a REBCO coated conductor. Mechanical properties are usually divided into two regions of elastic and plastic deformation. The macroscopic yielding took place at $R_{p0,2} = 682$ MPa. When the stress–strain curve is precisely analysed, a small change of slope started just after elastic limit (el) as point P shown in Figure 1 b). The tensile stress and strain at elastic limit are defined in principle as corresponding to the transition of elastic to plastic deformation as shown in Figure 1 b). The elastic strain limit is lying near $\epsilon_{el} = 0,05$ %. However their quantitative determination is difficult because the slope changes very gradually.

A.4 Gripping force

A weak gripping force results in slippage but a strong gripping force can break the gripped surface. Care should therefore be taken when adjusting the gripping force. A cushioning material such as sand paper may be inserted to prevent the gripped surfaces of the specimen from slipping and fracturing.

A.5 Percentage elongation after fracture (A_f)

The measurement of elongation after fracture is necessary to serve only as a reference. The movement of the cross-head may be used to find the approximate value for elongation after fracture, instead of using the butt method. To use this method, it is necessary to record the cross-head position at fracture. The following formula is used to obtain the elongation after fracture, given as a percentage.

$$A_f = 100 (L_f - L_o) / L_o \quad (\text{A.1})$$

where

A_f is the percentage elongation after fracture;

L_o is the initial inward distance between grips;

L_f is the distance between grips after fracture.

A.6 Condition of straining to fracture

Clause 4 describes that the test consists of straining a test piece by a tensile force, generally to fracture. In practice, however, it is difficult to strain properly the specimen to fracture, because the present specimen with equi-parallel tape shape often causes a grip fracture. The test straining to fracture is not the mandatory test condition.

A.7 Relative standard uncertainty (RSU)

To assess the quality of the measured data, the concept of uncertainty serves as a sound basis for an independent judgment [ISO/IEC Guide 98-3]. In the case of REBCO tapes, substantial information was gathered from the international RRT carried out recently by seven research groups [Osamura et al., 2014]. Four kinds of commercial REBCO superconductive tapes were used for test specimens as designated by A to D in Table A.1. Their general structural feature is characterized as follows. A thin superconductive layer with thickness of 1 μm to 2,5 μm is grown on the substrate via the intermediate oxide layers. The surface of superconductive layer is covered by a thin Ag layer. Metallic sheets with thickness of 40 μm to 100 μm are laminated on both sides. The data obtained by five repeated tests for each sample were reported by individual group.

Table A.1 – Relative standard uncertainty (X_{RSU}) and coefficient of variance ($X_{\text{<COV>}}$) for experimental data of E_0 and E_U

Sample	N^a	E_0		E_U	
		X_{RSU} (%)	$X_{\text{<COV>}}$ (%)	X_{RSU} (%)	$X_{\text{<COV>}}$ (%)
A	32	1,27	7,2	0,70	3,7
B	32	1,96	11,1	0,92	5,3
C	35	0,72	4,2	0,83	4,9
D	35	0,91	5,4	0,78	4,6

^a N is the total number of experiments accepted after the qualification test.

As mentioned in 8.1, the data were entrusted to the qualification test, where $\Delta = 0,2$ was employed. The number of experimental data available for the successive analysis was listed in Table A.1. For instance, all data ($N = 35$) were qualified for tapes C and D, but three of them were unqualified for tapes A and B.

The average of the modulus was calculated by using Formula (A.2),

$$\langle E_j \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_j(i) \quad (\text{A.2})$$

where j indicates 0 or U. Then the value of relative standard uncertainty (X_{RSU}) was evaluated from Formula (A.3),

$$X_{\text{RSU}_j} = \frac{100}{\langle E_j \rangle} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_j(i) - \langle E_j \rangle)^2}{N(N-1)}} \quad (\text{A.3})$$

The evaluated results are listed in Table A.1. Further, the RSU value relates to the coefficient of variance value (X_{COV}) as given in Formula (A.4),

$$X_{\text{RSU}_j} = \frac{X_{\text{COV}_j}}{\sqrt{N}} \quad (\text{A.4})$$

When knowing X_{RSU_j} and N , the X_{COV} could be obtained as given in Table A.1.

In the same manner, the statistical information on the 0,2 % proof strength was evaluated as listed in Table A.2.

Table A.2 – Relative standard uncertainty and coefficient of variance for experimental data of $R_{p0,2-0}$ and $R_{p0,2-U}$

Sample	N	$R_{p0,2-0}$		$R_{p0,2-U}$	
		X_{RSU} (%)	X_{COV} (%)	X_{RSU} (%)	X_{COV} (%)
A	28	0,83	4,7	0,86	4,9
B	32	0,58	3,3	0,66	3,7
C	35	0,83	4,9	0,71	4,2
D	35	0,70	4,1	0,58	3,4

As listed in Tables A.1 and A.2, the values of X_{RSU} and X_{COV} differ for different specimens, because mechanical properties like rigidity are different depending on the cross section and constituent materials, as analysed in detail in the literature [Osamura et al., 2014]. In order to establish the International Standard on the tensile test method for the practical REBCO tapes, it is reasonable to take a grand average of data for four tapes as listed in Table A.3. In conclusion, the standard uncertainty can be predicted from Formula (A.4), when the tensile test is carried out and the modulus and the proof strength are determined according to this document, where the constant X_{COV} value is given in Table A.3.

Table A.3 – Value of $X_{<COV>}$ for the data of the modulus of elasticity and the 0,2 % proof strength tested according to this document

	E_0	E_U	$R_{p0,2-0}$	$R_{p0,2-U}$
$X_{<COV>}$	7,0	4,6	4,3	4,1

A.8 Discretion applying this document

In order to guarantee the accuracy of this test method, it is necessary to confirm the testing conditions specified in Clause 7. However, when the supplier establishes the measurement technique, by which a sufficiently small RSU is realized for the measurement result, unless otherwise agreed upon between the customer and the supplier, the supplier may measure and report either E_0 or E_U by means of the customer's own technique.

A.9 Assessment on the reliability of the test equipment

The reliability of the test equipment, which comprises the tensile testing unit, load cell and extensometer, can be best analysed with wires of similar sizes and known elastic properties. Around 1 mm diameter welding wires of the materials aluminium and pure commercial titanium have been approved to be the most suitable ones which cover the modulus of elasticity range between 69 GPa and 105 GPa. The test laboratory should confirm the reliability of its tensile setup from time to time by measuring the elastic properties of these wires prior to any measurement task. These wires can be easily purchased from suppliers. For these tests the wires should be handled in the same manner as described for the case with superconducting heat treated wires. The wire can be loaded and unloaded in elastic regime up to 100 MPa without affecting its elastic properties.

A.10 Additional information for test report

A.10.1 General

The following information given in A.10.2 and A.10.3 is reported as an option upon requirement.

A.10.2 Test result

- Percentage elongation after fracture (A_f) derived from the stress–strain curves and the location of the fracture (i.e. within the extensometer or at the grips)
- Fracture strength (R_f)

A.10.3 Test conditions

- Initial strain rate
- Distance between grips
- Test temperature
- Manufacturer and model of testing machine
- Manufacturer and model of extensometer
- Gripping method

Annex B (informative)

Evaluation of combined standard uncertainty for the modulus of elasticity

B.1 Model equation

As given by Formula (3), the modulus of elasticity is defined as,

$$E = \Delta F / (S_0 \Delta A) \quad (\text{B.1})$$

where ΔF is the increment of force, ΔA is the increment of strain corresponding to ΔF , and S_0 is the original cross sectional area of the test specimen.

The stress is obtained from the dynamic force measurement using a load cell as follows [Osamura et al., 2010]. The specimen is pulled down with a constant strain rate, dA/dt , and the force is recorded from time to time by measuring the output of the load cell through the electric circuit. In principle, the measured voltage (V) is calibrated by using the correction factor obtained from the static measurement of the standard mass (P_0), of which measured voltage is given by V_0 . Thus the absolute value of ΔF is determined from the proportionality to the standard mass as follows,

$$\Delta F = \frac{V}{V_0} P_0 \quad (\text{B.2})$$

The ΔA in % is given by Formula (B.3),

$$\Delta A = 100 \frac{\Delta L}{L_G} \quad (\text{B.3})$$

where ΔL is the displacement of extensometer with the gauge length of L_G . When the tape has a rectangular cross section with thickness t and width w , the area is given as,

$$S_0 = t \times w \quad (\text{B.4})$$

When putting Formulas (B.2), (B.3) and (B.4) into Formula (B.1), the modulus of elasticity is given as,

$$E = \frac{1}{100} \times \frac{V}{V_0} P_0 \frac{1}{t \times w} \frac{L_G}{\Delta L} \quad (\text{B.5})$$

Formula (B.5) includes seven independent variables which are taken into consideration in order to evaluate uncertainties relating to the modulus of elasticity. The combined standard uncertainty is given as,

$$\begin{aligned}
u_c^2 = & \left(\frac{\partial E}{\partial \Delta F} \right)^2 \left[\left(\frac{\partial \Delta F}{\partial V} \right)^2 u_V^2 + \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial V_0} \right)^2 u_{V_0}^2 + \left(\frac{\partial \Delta F}{\partial P_0} \right)^2 u_{P_0}^2 \right] \\
& + \left(\frac{\partial E}{\partial \Delta A} \right)^2 \left[\left(\frac{\partial \Delta A}{\partial L} \right)^2 u_{\Delta L}^2 + \left(\frac{\partial \Delta A}{\partial L_G} \right)^2 u_{L_G}^2 \right] + \left(\frac{\partial E}{\partial S_0} \right)^2 \left[\left(\frac{\partial S_0}{\partial t} \right)^2 u_t^2 + \left(\frac{\partial S_0}{\partial w} \right)^2 u_w^2 \right]
\end{aligned} \quad (B.6)$$

B.2 Estimation of standard uncertainty

B.2.1 Precondition

First of all, in order to estimate a degree of uncertainty, it is necessary to fix the precondition as follows. A representative point "P" on the stress-strain curve in Figure 1 b) is given as $R = \Delta F/S_0 = 69,8$ MPa and $\Delta A = 0,05$ %, which results in $E = 142,3$ GPa. There the following seven experimental variables give the precondition for the uncertainty evaluation as $V = 0,143$ V, $V_0 = 2,5$ V, $P_0 = 500$ N, $L_G = 25$ mm, $\Delta L = 12,5 \times 10^{-3}$ mm, $r = 0,10$ mm, and $w = 4,1$ mm.

B.2.2 Stress measurement

B.2.2.1 Uncertainty of the standard mass (P_0)

In order to approve the 1 000 N load cell, the standard mass of $P_0 = 500$ N was used. As its accuracy is guaranteed to be 0,05 % by the manufacturer, the value of type-B standard uncertainty is given as,

$$u_{P_0} = \frac{0,0005 \times 500}{\sqrt{3}} = 0,14 \text{ N} \quad (B.7)$$

B.2.2.2 Static measurement of the standard mass (V_0)

The load cell gives output voltage of 5,0 V for 1 000 N and its accuracy is 0,25 %. The output voltage is 2,5 V for the 500 N load and the standard uncertainty is given as,

$$u_{21} = \frac{0,0025 \times 2,5}{\sqrt{3}} = 3,61 \times 10^{-3} \text{ V} \quad (B.8)$$

Temperature sensitivity of the load cell is 0,07 %/K and the maximum temperature change during calibration and measurement is presumed to be ± 2 K. Then the standard uncertainty for the measurement of 2,5 V is given as,

$$u_{22} = \frac{0,0007 \times 2,5 \times 2}{\sqrt{3}} = 2,02 \times 10^{-3} \text{ V} \quad (B.9)$$

Then the combined standard uncertainty is given as,

$$u_{V_0} = \sqrt{u_{21}^2 + u_{22}^2} = 1,06 \times 10^{-2} \text{ V} \quad (B.10)$$

B.2.2.3 Dynamic measurement of the force applied to the test sample (V)

As a precondition, the output voltage from the load cell with accuracy of 0,25 % is $V = 0,143$ V. The standard uncertainty is given as,

$$u_{31} = \frac{0,0025 \times 0,143}{\sqrt{3}} = 2,06 \times 10^{-4} \text{ V} \quad (\text{B.11})$$

Similarly the standard uncertainty for the temperature sensitivity is given as,

$$u_{32} = \frac{0,0007 \times 0,143 \times 10}{\sqrt{3}} = 7,58 \times 10^{-4} \text{ V} \quad (\text{B.12})$$

where the number 10 is half of the maximum difference among testing temperatures. The initial cross head speed (dL_0/dt) was selected 3×10^{-2} mm/s for the grip distance (L_0) of 100 mm. Then the initial strain rate is given as,

$$\frac{dA}{dt} = \frac{1}{L_0} \frac{dL_0}{dt} = 3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1} \quad (\text{B.13})$$

The increasing rate of output voltage is given as,

$$\frac{5}{1000} \frac{dP}{dt} = 0,005 \times t \times w \times E \frac{dA}{dt} = 8,75 \times 10^{-2} \text{ V/s} \quad (\text{B.14})$$

As the sampling time is 60 ms, the standard uncertainty is given as,

$$u_{33} = \frac{8,75 \times 10^{-2} \times \frac{0,06}{2}}{\sqrt{3}} = 1,51 \times 10^{-3} \text{ V} \quad (\text{B.15})$$

The combined standard uncertainty is given as,

$$u_V = \sqrt{u_{31}^2 + u_{32}^2 + u_{33}^2} = 1,70 \times 10^{-3} \text{ V} \quad (\text{B.16})$$

B.2.3 Size measurement

B.2.3.1 Uncertainties on tape thickness measurement (t)

The thickness was measured by using the micrometer with minimum scale of 2 μm . Then the standard uncertainty is given as,

$$u_{41} = \frac{0,001}{\sqrt{3}} = 5,77 \times 10^{-4} \text{ mm} \quad (\text{B.17})$$

Temperature sensitivity of the micrometer is $20 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ and the maximum difference among measuring temperatures is presumed to be 20 K. Then the standard uncertainty for the thickness measurement of 0,10 mm is given as,

$$u_{42} = \frac{0,10 \times (20 \times 10^{-6}) \times 10}{\sqrt{3}} = 1,15 \times 10^{-5} \text{ mm} \quad (\text{B.18})$$

Then the combined standard uncertainty for thickness measurement is given as,

$$u_t = \sqrt{u_{41}^2 + u_{42}^2} = 5,77 \times 10^{-4} \text{ mm} \quad (\text{B.19})$$

B.2.3.2 Uncertainties on tape width measurement

The width was measured by using the slide calliper with minimum scale of 50 µm. Then the standard uncertainty is given as,

$$u_{51} = \frac{0,025}{\sqrt{3}} = 1,44 \times 10^{-2} \text{ mm} \quad (\text{B.20})$$

Temperature sensitivity of the slide calliper is $20 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ and the maximum difference among measuring temperatures is presumed to be 20 K. Then the standard uncertainty for the width measurement of 4,1 mm is given as,

$$u_{52} = \frac{4,1 \times (20 \times 10^{-6}) \times 10}{\sqrt{3}} = 4,73 \times 10^{-4} \text{ mm} \quad (\text{B.21})$$

Then the combined standard uncertainty for width measurement is given as,

$$u_w = \sqrt{u_{51}^2 + u_{52}^2} = 1,44 \times 10^{-2} \text{ mm} \quad (\text{B.22})$$

B.2.4 Strain measurement

The elongation was measured by using the extensometer with minimum scale of 0,2 µm. Then the standard uncertainty is given as,

$$u_{61} = \frac{0,0001}{\sqrt{3}} = 5,77 \times 10^{-5} \text{ mm} \quad (\text{B.23})$$

Temperature sensitivity of the extensometer is 15 ppm/K and the maximum difference among measuring temperatures is presumed to be 20 K. Then the standard uncertainty for the measurement of 0,0125 mm is given as,

$$u_{62} = \frac{(12,5 \times 10^{-3}) \times (15 \times 10^{-6}) \times 10}{\sqrt{3}} = 1,08 \times 10^{-6} \text{ mm} \quad (\text{B.24})$$

The extensometer with gauge length of 25 mm was elongated temporarily by the strain rate of $3 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$. As the sampling time was 0,06 s, the standard uncertainty is given as,

$$u_{63} = \frac{25 \times (3 \times 10^{-4}) \times 0,03}{\sqrt{3}} = 1,30 \times 10^{-4} \text{ mm} \quad (\text{B.25})$$

The partial combined standard uncertainty for the elongation is given as,

$$u_{\Delta L} = \sqrt{u_{61}^2 + u_{62}^2 + u_{63}^2} = 1,42 \times 10^{-4} \text{ mm} \quad (\text{B.26})$$

B.2.5 Uncertainties on measurement of gauge length

The gauge length (L_G) was measured by using the slide calliper with minimum scale of 50 μm . Then the standard uncertainty is given as,

$$u_{71} = \frac{0,025}{\sqrt{3}} = 1,44 \times 10^{-2} \text{ mm} \quad (\text{B.27})$$

Temperature sensitivity of the calliper is $20 \times 10^{-6} \text{ K}^{-1}$ and the difference among measuring temperatures is presumed to be 20 K. Then the standard uncertainty for the gauge length measurement of 25 mm is given as,

$$u_{72} = \frac{25 \times (20 \times 10^{-6}) \times 10}{\sqrt{3}} = 2,88 \times 10^{-3} \text{ mm} \quad (\text{B.28})$$

Then the combined standard uncertainty for width measurement is given as,

$$u_{LG} = \sqrt{u_{71}^2 + u_{72}^2} = 1,46 \times 10^{-2} \text{ mm} \quad (\text{B.29})$$

Table B.1 – Uncertainties for experimental variables in Formula (B.6)

Factor	X_j	$\frac{\partial E}{\partial X_j}$	u_{X_j}	$\frac{\partial E}{\partial X_j} u_{X_j}$ [MPa]	$\frac{\partial E}{\partial X_j} \frac{u_{X_j}}{E}$ [%]
Standard mass	$P_0 = 500 \text{ [N]}$	$2,84 \times 10^2 \text{ [mm}^{-2}\text{]}$	0,14 [N]	39,8	0,028
Voltage for standard mass	$V_0 = 2,5 \text{ [V]}$	$5,69 \times 10^4 \text{ [MPa/V]}$	$4,13 \times 10^{-3} \text{ [V]}$	23,5	0,016
Voltage for applied force	$V = 0,143 \text{ [V]}$	$9,95 \times 10^5 \text{ [MPa/V]}$	$1,70 \times 10^{-3} \text{ [V]}$	$1,69 \times 10^3$	1,19
Thickness	$t = 0,10 \text{ [mm]}$	$1,42 \times 10^6 \text{ [MPa/mm]}$	$5,77 \times 10^{-4} \text{ [mm]}$	819	0,576
Width	$w = 4,1 \text{ [mm]}$	$3,47 \times 10^4 \text{ [MPa/mm]}$	$1,44 \times 10^{-2} \text{ [mm]}$	499	0,351
Elongation	$\Delta L = 0,0125 \text{ [mm]}$	$1,14 \times 10^7 \text{ [MPa/mm]}$	$1,42 \times 10^{-4} \text{ [mm]}$	$1,61 \times 10^3$	1,13
Gauge length	$L_G = 25 \text{ [mm]}$	$5,62 \times 10^3 \text{ [MPa/mm]}$	$1,46 \times 10^{-2} \text{ [mm]}$	83,1	0,058

As a summary, the combined standard uncertainty given by Formula (B.6) was evaluated by using data of Table B.1. The result is given in Table B.2, where SU is the combined standard uncertainty, u_C in GPa, RSU is the relative standard uncertainty, u_C/E in %, EU is the expanded uncertainty, ku_C in GPa with coverage factor of $k = 2$ and REU is the relative expanded uncertainty.

Table B.2 – Summary of standard uncertainty evaluation, where the initial strain rate and the thickness were used as 3×10^{-4} /s and 0,1 mm, respectively

E [GPa]	Value of SU [GPa]	Value of RSU [%]	Value of EU [GPa]	Value of REU [%]
142,3	2,5	1,8	5,0	3,6

B.3 Significant experimental factor

B.3.1 Initial strain rate [Osamura et al., 2014]

Looking at Table B.1, the major factors contributing to the uncertainties are V , ΔL and t in sequence. The first two terms of V and ΔL are related to the initial strain rate. So the relative standard uncertainty given by Formula (B.6) was calculated as a function of initial strain rate as shown in Figure B.1, where two cases with different tape thickness were examined. The initial strain rate should be suppressed less than $1 \times 10^{-4} \text{ s}^{-1}$ in order to realize a measurement with low standard uncertainty.

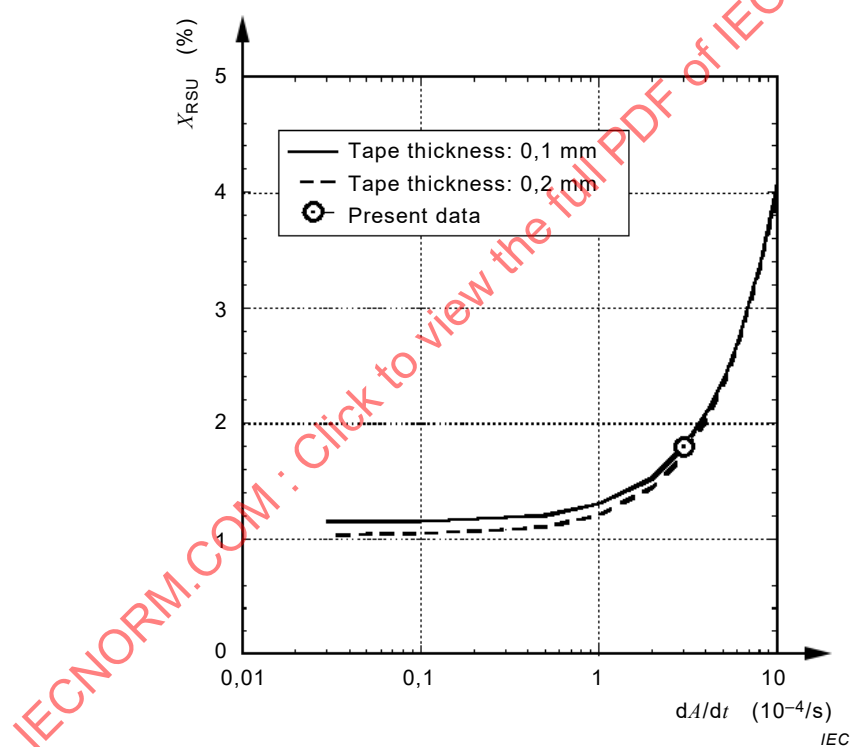


Figure B.1 – Strain rate dependence of the relative standard uncertainty given by Formula (B.6)

Two cases with different tape thickness were evaluated and the open circle indicates the main result for the precondition described in B.2.1.

B.3.2 Thickness measurement [Osamura et al., 2014]

When the tape thickness is measured by means of the micrometer, a large uncertainty is caused because of its relatively large minimum resolution of 0,001 mm ($= \Delta t$) and the rough finishing irregularity of the tape surface after soldering or electro-plating. The value of type-B relative standard uncertainty (X_{RSU}) due to the instrumental error when using the micrometer is given as,

$$X_{RSU}(t; N) = 100 \times \frac{\Delta t}{\sqrt{3N} \times t} \% \quad (\text{B.30})$$

where t is the thickness and N is the repeated number of measurements. Figure B.2 shows the change of RSU value as a function of average thickness of each tape, where Formula (B.30) with $N = 1$ is indicated as a function of thickness. The symbols "A" to "D" are the names of REBCO tapes used for the international RRT [Osamura et al., 2014]. The observed RSU values were larger by two to three times than the type-B value for all tapes. This result suggests that the measurement error is caused from the thickness irregularity rather than from the instrumental uncertainty given by Formula (B.30). Due to the manufacturing technique, a particular thickness irregularity tends to occur as non-uniform cross section like dog-bone or convex-lens shape and so on. The shape of spindle of the micrometer was flat for all micrometers used in the present RRT [Osamura et al., 2014]. Either hemisphere or flat shaped anvil was used by laboratories. In this document, it is recommended to use the micrometer as a popular and common procedure to measure thickness. A more quantitative method like an image analysis might be employed when it is necessary to consider precisely thickness irregularity.

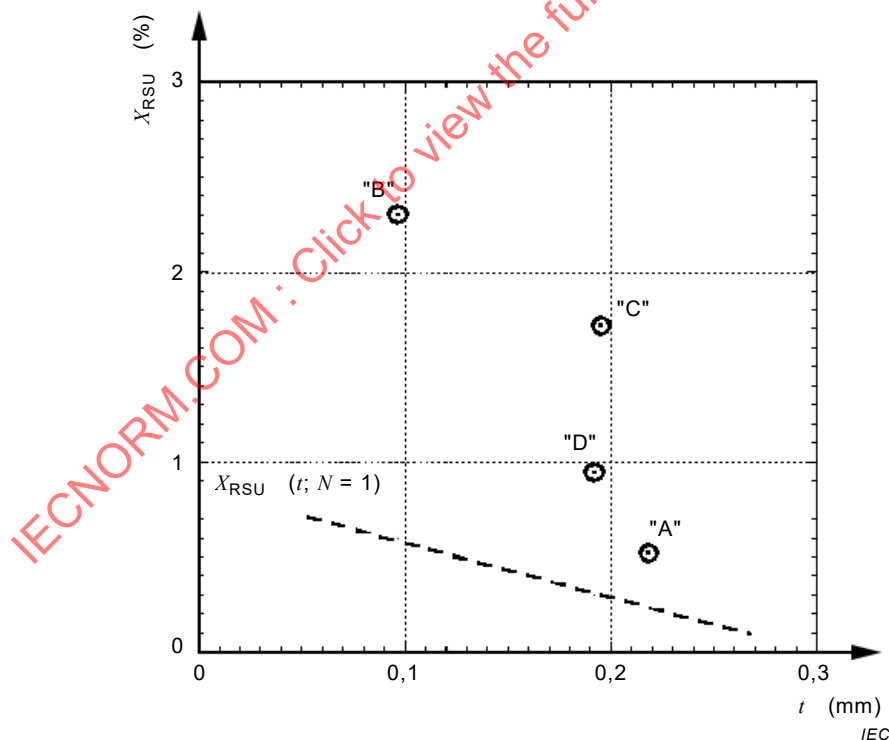


Figure B.2 – Relative standard uncertainty for the thickness measurement as a function of tape thickness

Bibliography

ISO/IEC Guide 98-3, *Uncertainty of measurement – Part 3: Guide to the expression of uncertainty in measurement (GUM:1995)*

IEC 60050-815:2015, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 815: Superconductivity* (available at <http://www.electropedia.org/>)

IEC 61788-6:2011, *Superconductivity – Part 6: Mechanical properties measurement – Room temperature tensile test of Cu/Nb-Ti composite superconductors*

IEC 61788-18:2013, *Superconductivity – Part 18: Mechanical properties measurement – Room temperature tensile test of Ag- and/or Ag alloy-sheathed Bi-2223 and Bi-2212 composite superconductors*

IEC 61788-19:2013, *Superconductivity – Part 19: Mechanical properties measurement – Room temperature tensile test of reacted Nb₃Sn composite superconductors*

IEC 61788-21:2015, *Superconductivity – Part 21: Superconducting wires – Test methods for practical superconducting wires – General characteristics and guidance*

ISO 6892-1, *Metallic materials – Tensile testing – Part 1: Method of test at room temperature*

ASTM E 83-85, *Standard Practice for Verification and Classification of Extensometers*

K. Osamura, A. Nyilas, M. Thoener, B. Seeber, R. Fluekiger, Y. Ilyin, A. Nijhuis, J. Ekin, C. Clickner, R.P. Walsh, V. Toplosky, H. Shin, K. Katagiri, S. Ochiai, M. Hojo, Y. Kubo, and K. Miyashita, International Round Robin Test for Mechanical Properties of Nb₃Sn Superconductive Wires at Room Temperature, *Supercond. Sci. Technol.* 21 (2008) 045006-045015

K. Osamura, A. Nyilas and H. Shin, Estimation of uncertainty with the modulus of elasticity measured by means of tensile test for BSCCO tapes, *Cryogenics* 50 (2010) 660-665

K. Osamura, H.-S. Shin, K.-P. Weiss, A. Nyilas, A. Nijhuis, K. Yamamoto, S. Machiya and G. Nishijima; International Round Robin Test for Mechanical Properties of REBCO Superconductive Tapes at Room Temperature, *Supercond. Sci. Technol.* 27 (2014) 085009

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	30
INTRODUCTION.....	32
1 Domaine d'application	33
2 Références normatives	33
3 Termes et définitions	33
4 Principe	36
5 Appareillage	36
5.1 Généralités	36
5.2 Machine d'essai	36
5.3 Extensomètre.....	36
6 Préparation de l'éprouvette.....	36
6.1 Généralités	36
6.2 Longueur de l'éprouvette	36
6.3 Détermination de la surface de section (S_0)	37
7 Conditions d'essai	37
7.1 Serrage de l'éprouvette.....	37
7.2 Mise en place de l'extensomètre	37
7.3 Vitesse d'essai.....	37
7.4 Essai	37
8 Calcul des résultats	37
8.1 Module d'élasticité (E).....	37
8.2 Charge d'épreuve à 0,2 % ($R_{p0,2-H}$ et $R_{p0,2-U}$).....	38
9 Incertitude de mesure	39
10 Rapport d'essai	39
10.1 Eprouvette	39
10.2 Résultats	39
Annexe A (informative) Informations complémentaires relatives aux Articles 1 à 10	40
A.1 Généralités	40
A.2 Extensomètre.....	40
A.2.1 Extensomètre double	40
A.2.2 Extensomètre simple	42
A.3 Limite élastique.....	42
A.4 Force de serrage	43
A.5 Pourcentage d'allongement après rupture (A_f)	43
A.6 Condition de déformation jusqu'à la rupture	43
A.7 Incertitude type relative.....	43
A.8 Discretion applicable au présent document	45
A.9 Evaluation de la fiabilité du matériel d'essai.....	45
A.10 Informations complémentaires pour le rapport d'essai.....	46
A.10.1 Généralités	46
A.10.2 Résultat d'essai	46
A.10.3 Conditions d'essai	46
Annexe B (informative) Evaluation de l'incertitude type composée pour le module d'élasticité	47
B.1 Equation du modèle	47
B.2 Evaluation de l'incertitude type	48

B.2.1	Condition préalable.....	48
B.2.2	Mesure de la contrainte	48
B.2.3	Mesure de la taille	49
B.2.4	Mesure de la déformation	50
B.2.5	Incertitudes de mesure de longueur entre repères	50
B.3	Facteur expérimental significatif.....	52
B.3.1	Taux de déformation initial [Osamura et al., 2014]	52
B.3.2	Mesure de l'épaisseur [Osamura et al., 2014]	52
	Bibliographie.....	54
	Figure 1 – Courbe contrainte-déformation type et définition des modules d'élasticité et des charges d'épreuve à 0,2 %	35
	Figure A.1 – Extensomètre de type jumeau de Siam à faible masse.....	40
	Figure A.2 – Extensomètre double à faible masse.....	41
	Figure A.3 – Exemple d'extensomètre muni d'une masse d'équilibrage et d'un axe d'éprouvette vertical	42
	Figure B.1 – Dépendance du taux de déformation par rapport à l'incertitude type relative donnée par la Formule (B.6)	52
	Figure B.2 – Incertitude type relative pour la mesure d'épaisseur en fonction de l'épaisseur de bande.....	53
	Tableau A.1 – Incertitude type relative (X_{RSU}) et coefficient de variation ($X_{<COV>}$) pour les données expérimentales de E_0 et E_U	44
	Tableau A.2 – Incertitude type relative et coefficient de variation pour les données expérimentales de $R_{p0,2-0}$ et $R_{p0,2-U}$	45
	Tableau A.3 – Valeur du $X_{<COV>}$ pour les données du module d'élasticité et de la charge d'épreuve à 0,2 % soumises à essai selon le présent document.....	45
	Tableau B.1 – Incertitudes concernant les variables expérimentales dans la Formule (B.6)	51
	Tableau B.2 – Résumé de l'évaluation des incertitudes types, où le taux de déformation initial et l'épaisseur utilisés étaient respectivement 3×10^{-4} /s et 0,1 mm	51

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

SUPRACONDUCTIVITÉ –

**Partie 25: Mesure des propriétés mécaniques –
Essai de traction à température ambiante des fils REBCO**

AVANT-PROPOS

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

La Norme internationale IEC 61788-25 a été établie par le comité d'études 90 de l'IEC: Supraconductivité.

Le texte de cette Norme internationale est issu des documents suivants:

FDIS	Rapport de vote
90/404/FDIS	90/411/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 internationale.

Ce document a été rédigé selon les Directives ISO/IEC, Partie 2.

Une liste de toutes les parties de la série IEC 61788, publiées sous le titre général *Supraconductivité*, peut être consultée sur le site web de l'IEC.

Le comité a décidé que le contenu de ce document ne sera pas modifié avant la date de stabilité indiquée sur le site web de l'IEC sous "<http://webstore.iec.ch>" dans les données relatives au document recherché. A cette date, le document sera

- reconduit,
- supprimé,
- remplacé par une édition révisée, ou
- amendé.

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

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-25:2018

INTRODUCTION

Plusieurs types de supraconducteurs composites sont actuellement commercialisés. Le supraconducteur à base d'oxyde de terre rare de formule chimique $\text{REBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$ est utilisé pour les fils supraconducteurs à usage pratique, dans lesquels l'élément de terre rare RE est typiquement Y, Dy, Gd, Nd, Ho ou Sm, ou une combinaison de deux de ces éléments ou plus. Ce type de fil supraconducteur pratique est généralement désigné par le terme «conducteur REBCO». Son architecture typique comprend un substrat à base de Ni-Cr-Mo, Ni-W ou en acier inoxydable, une couche tampon composée d'une pluralité d'oxydes, une couche supraconductrice et une couche protectrice d'Ag. Le substrat et la couche tampon servent de base pour faciliter la bonne orientation de la couche supraconductrice. Afin de pouvoir résister à la force électromagnétique élevée, les fils sont souvent renforcés extérieurement par des feuilles minces stratifiées en acier inoxydable ou en alliage de cuivre. Les supraconducteurs composites vendus dans le commerce ont une forte densité de courant et une section réduite. La principale application des supraconducteurs composites est la construction de dispositifs d'alimentation électrique et d'aimants supraconducteurs. Des contraintes et déformations complexes sont appliquées aux fils supraconducteurs composites lors de la fabrication et de la mise sous tension des dispositifs. Dans le cas des aimants supraconducteurs, les enroulements sont soumis à des forces électromagnétiques importantes en raison des effets conjugués des champs magnétiques de forte intensité et d'une forte densité de courant. Il est donc indispensable de déterminer les propriétés mécaniques des conducteurs REBCO.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-25:2018

SUPRACONDUCTIVITÉ –

Partie 25: Mesure des propriétés mécaniques – Essai de traction à température ambiante des fils REBCO

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61788 spécifie la méthode et les procédures d'essai relatives aux propriétés mécaniques de traction des bandes composites supraconductrices REBCO à température ambiante. Cet essai est utilisé pour mesurer le module d'élasticité et la charge d'épreuve à 0,2 %. Les valeurs de la limite élastique, de la résistance à la rupture et du pourcentage d'allongement après rupture servent uniquement de référence. Le présent document s'applique aux échantillons ayant une section rectangulaire d'une surface comprise entre 0,12 mm² et 6,0 mm² (correspondant aux bandes de largeur comprise entre 2,0 mm et 12,0 mm et d'épaisseur comprise entre 0,06 mm et 0,5 mm).

2 Références normatives

Les documents suivants cités dans le texte constituent, pour tout ou partie de leur contenu, des exigences du présent document. Pour les références datées, seule l'édition citée s'applique. Pour les références non datées, la dernière édition du document de référence s'applique (y compris les éventuels amendements).

ISO 376, *Matériaux métalliques – Etalonnage des instruments de mesure de force utilisés pour la vérification des machines d'essais uniaxiaux*

ISO 7500-1, *Matériaux métalliques – Etalonnage et vérification des machines pour essais statiques uniaxiaux – Partie 1: Machines d'essai de traction/compression – Etalonnage et vérification du système de mesure de force*

ISO 9513, *Matériaux métalliques – Etalonnage des chaînes extensométriques utilisées lors d'essais uniaxiaux*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions suivants s'appliquent.

L'ISO et l'IEC tiennent à jour des bases de données terminologiques destinées à être utilisées en normalisation, consultables aux adresses suivantes:

- IEC Electropedia: disponible à l'adresse <http://www.electropedia.org/>
- ISO Online browsing platform: disponible à l'adresse <http://www.iso.org/obp>

3.1

contrainte de traction

R

force de traction divisée par la section de l'éprouvette à tout moment durant l'essai

3.2

déformation de traction

A

incrément de déplacement divisé par la longueur initiale entre repères des extensomètres à tout moment durant l'essai de traction

3.3

longueur entre repères d'un extensomètre

L_G

longueur de la partie parallèle de l'éprouvette utilisée pour la mesure de l'allongement au moyen d'un extensomètre

3.4

distance entre pinces

L_0

distance intérieure comprise entre les pinces qui maintiennent une éprouvette en position avant de démarrer l'essai

3.5

module d'élasticité

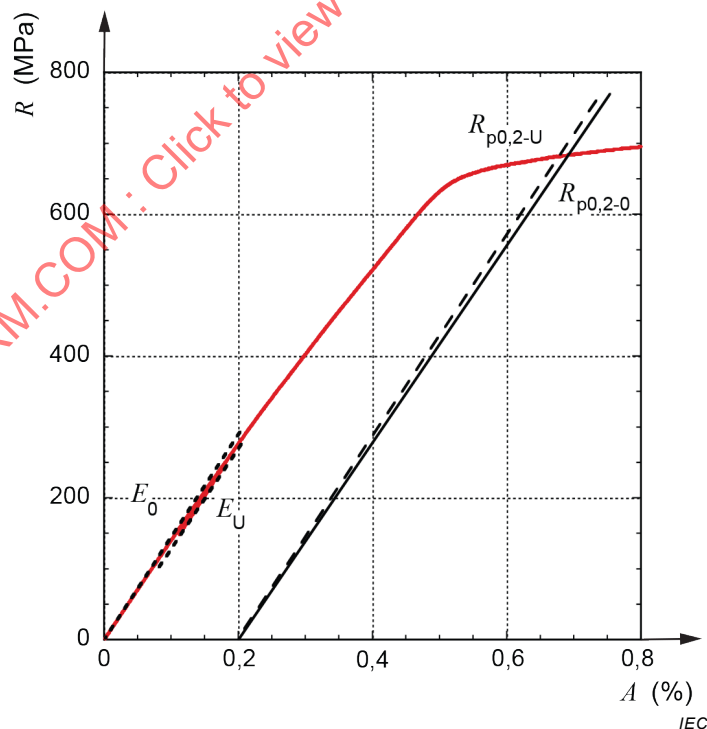
E

pente de la partie rectiligne de la courbe contrainte-déformation dans la région de déformation élastique

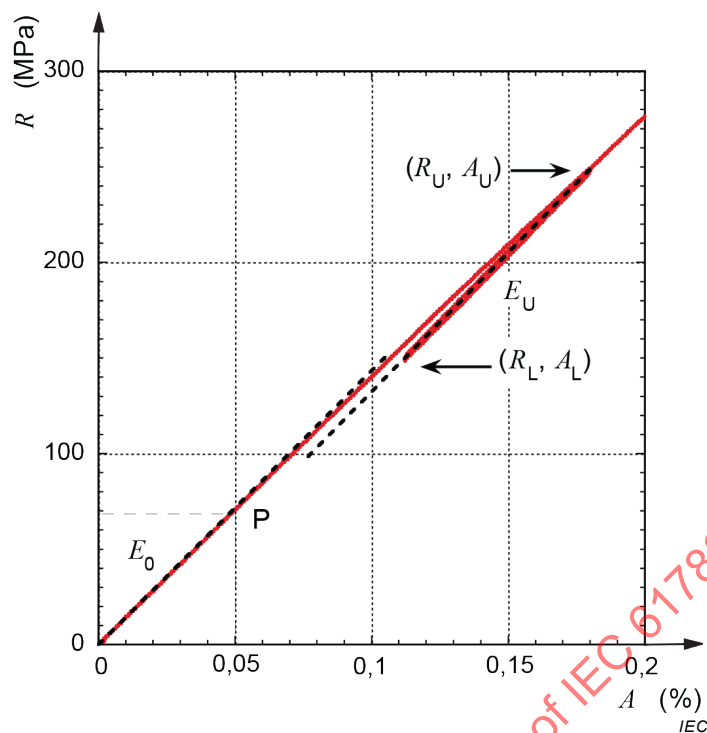
VOIR: Figure 1

Note 1 à l'article: La partie rectiligne de la courbe contrainte-déformation initiale est très étroite, comme indiqué à la Figure 1. Pour mesurer cette grandeur avec une faible incertitude type, l'utilisation de systèmes à extensomètre double constitue une technique appropriée. Ainsi, il convient de représenter la grandeur de E_U comme une valeur représentative du présent texte, tandis qu'il convient d'indiquer la valeur de E_0 uniquement lorsque la mesure est réalisée au moyen d'un système à extensomètre double.

Note 2 à l'article: Cependant, dans le cas d'un supraconducteur composite, il peut être déterminé différemment en fonction des modes opératoires adoptés; le premier d'après la courbe de chargement initial par la ligne de décalage nul, exprimé par E_0 , le deuxième donné par la pente de la ligne durant le déchargement, exprimé par E_U . Les lignes droites en pointillés dessinées le long de la courbe de chargement initial et de la courbe de déchargement à la Figure 1 b) servent uniquement de guide visuel pour déterminer la pente.



a)



b)

Les courbes rouges représentent les données observées et les lignes droites noires continues et noires en pointillés sont des lignes ajoutées pour indiquer comment déterminer les modules d'élasticité et les charges d'épreuve à 0,2 %.

Figure 1 – Courbe contrainte-déformation type et définition des modules d'élasticité et des charges d'épreuve à 0,2 %

3.6

charge d'épreuve à 0,2 %

 $R_{p0,2}$

valeur de contrainte lorsque le fil composite supraconducteur se déforme de 0,2 %

VOIR: Figure 1

3.7

résistance à la rupture

 R_f

contrainte de traction à la rupture

3.8

contrainte de traction à la limite élastique

 R_{el}

force de traction divisée par la surface de section originale à la limite élastique correspondant à la transition entre déformation élastique et plastique indiquée par le point P dans la Figure 1 b)

3.9

déformation de traction à la limite élastique

 A_{el}

déformation à la limite élastique correspondant à la transition entre déformation élastique et plastique indiquée par le point P dans la Figure 1 b)

4 Principe

L'essai consiste à déformer une éprouvette au moyen d'une force de traction, généralement jusqu'à la rupture, dans le but de déterminer le module d'élasticité et la charge d'épreuve à 0,2 % selon la description donnée à l'Article 1.

Selon la méthode de mesure de déformation utilisée, il convient toutefois de limiter les grandeurs déterminées par le présent essai. Dans le cadre de l'utilisation d'un système d'extensomètre simple classique, la détermination de E_U et $R_{p0,2-U}$ est recommandée. Par ailleurs, toutes les grandeurs de E_0 , E_U , $R_{p0,2-0}$ et $R_{p0,2-U}$ peuvent être déterminées au moyen d'un système d'extensomètre double, grâce à sa capacité de compenser les effets de flexion de l'éprouvette, garantissant ainsi une détermination correcte du module d'élasticité.

Des informations complémentaires relatives aux Articles 1 à 10 sont données à l'Annexe A.

5 Appareillage

5.1 Généralités

La machine d'essai et l'extensomètre doivent respectivement être conformes à l'ISO 7500-1 et à l'ISO 9513. L'étalonnage doit satisfaire à l'ISO 376. L'exigence particulière du présent document est présentée au 5.2 et au 5.3.

5.2 Machine d'essai

Un système de régulation de la machine d'essai de traction fournissant une vitesse de déplacement constante doit être utilisé. Les pinces doivent avoir une structure et une résistance appropriées à l'éprouvette et doivent être construites de manière à réaliser une liaison solide avec la machine d'essai de traction. Les faces des pinces doivent être limées ou moletées, ou sinon rugueuses, de façon que l'éprouvette ne glisse pas durant l'essai. Le serrage peut être du type à vis, ou pneumatique ou actionné de manière hydraulique.

5.3 Extensomètre

La masse de l'extensomètre doit être inférieure ou égale à 30 g, de façon à ne pas influencer sur les propriétés mécaniques des fils composites supraconducteurs. La masse des extensomètres doit être équilibrée symétriquement par rapport au fil pour éviter toute force de non-alignement. L'application de moments de flexion générés par la force de non-alignement doit être évitée (voir Article A.2).

6 Préparation de l'éprouvette

6.1 Généralités

La flexion et/ou le préchargement doivent être évités lorsque l'éprouvette est manipulée manuellement

6.2 Longueur de l'éprouvette

La longueur de l'éprouvette doit être égale à la somme de la distance intérieure entre les pinces et la longueur des pinces. La longueur minimale de l'éprouvette (L_{sm}) doit être calculée comme suit,

$$L_{sm} = 2 \times L_g + L_G + 2 \times L_x \quad (1)$$

où L_g est la longueur de la pince, L_G est la longueur entre repères de l'extensomètre. L_x est la distance de l'intervalle libre entre la pince et l'extensomètre et doit remplir la condition suivante,

$$L_x \geq 0,7 \times L_G \quad (2)$$

6.3 Détermination de la surface de section (S_0)

Un micromètre ou un autre appareil de mesure de dimension doit être utilisé pour obtenir la surface de section de l'éprouvette après avoir enlevé le revêtement isolant. La surface de section des fils en forme de bande doit être obtenue à partir du produit de son épaisseur par sa largeur.

7 Conditions d'essai

7.1 Serrage de l'éprouvette

Lorsque l'éprouvette est montée sur les pinces de la machine d'essai de traction, l'éprouvette et l'axe du chargement en traction doivent se trouver sur la même ligne droite. Du papier abrasif peut être inséré comme matériau d'amortissement pour empêcher les surfaces serrées de glisser ou de se fracturer. Pendant le montage de l'échantillon, toute flexion ou déformation doit être évitée.

7.2 Mise en place de l'extensomètre

Lors du montage de l'extensomètre, toute déformation de l'éprouvette doit être évitée, comme dans le cas d'une empreinte due aux bords tranchants de l'extensomètre pouvant provoquer une rupture précoce de l'éprouvette. L'extensomètre doit être monté au centre des pinces, en alignant la direction de mesure avec la direction de l'axe de l'éprouvette. Durant le montage, le préchargement de l'éprouvette doit être évité. Après installation, le chargement doit être physiquement annulé.

7.3 Vitesse d'essai

Le taux de déformation initial doit être inférieur à 10^{-4} s^{-1} au cours de l'essai utilisant l'extensomètre (voir B.3.1).

7.4 Essai

La machine d'essai de traction doit être démarrée après le réglage de la vitesse d'essai au niveau spécifié. La contrainte et la déformation calculées d'après les signaux de sortie de la cellule de charge et de l'extensomètre doivent être tracées respectivement en ordonnée et en abscisse sur le diagramme représenté sur la Figure 1 a) et b). Lorsque la déformation a atteint une valeur comprise entre 0,1 % et 0,2 % indiquée par A_U , la contrainte doit être réduite d'environ 30 % à 40 % de R_U à R_L . La contrainte doit alors être augmentée à nouveau et il convient de poursuivre l'essai jusqu'au point de rupture de l'éprouvette.

Avant de commencer tout programme d'essai de matériau, le matériel d'essai doit faire l'objet d'une vérification complète au moyen de fils de dimensions similaires ayant des propriétés élastiques connues (voir Article A.9).

8 Calcul des résultats

8.1 Module d'élasticité (E)

Le module d'élasticité doit être calculé en général en utilisant la formule suivante et la partie rectiligne de la courbe de chargement initial et de la courbe de déchargement, comme indiqué à la Figure 1 b). Pour une analyse postérieure des données tracées, il convient d'utiliser un

logiciel approprié pour l'évaluation des données, comportant la fonction d'agrandissement de la courbe contrainte-déformation, en particulier autour de la région où l'on s'attend à un écart par rapport à la linéarité.

$$E = \Delta F / (S_0 \Delta A) \quad (3)$$

où

E est le module d'élasticité (GPa);

ΔF est l'incrément de la force (N);

ΔA est l'incrément de la déformation correspondant à ΔF ;

S_0 est la surface de section originale de l'éprouvette (mm²).

Puisque le processus de déchargement est exécuté pour la déformation indiquée par le point A_U de la Figure 1, la même Formule (3) est utilisée à la fois pour le module de déchargement (E_U) et pour le module de chargement initial (E_0). Il est recommandé de mesurer la courbe de déchargement au point de départ A_U , où la valeur recommandée de A_U est d'environ 0,1 % à 0,2 %.

Après l'essai, les résultats doivent être examinés en utilisant le rapport E_0/E_U . Le rapport doit satisfaire à la condition donnée par la Formule (4) dans laquelle $\Delta = 0,2$ ([Osamura et al., 2008 et 2014]).

$$1 - \Delta < \frac{E_0}{E_U} < 1 + \Delta \quad (4)$$

Lorsque cette condition n'est pas satisfaite, on estime que l'essai n'est pas valable. L'essai doit ensuite être répété après avoir vérifié le mode opératoire expérimental selon la présente méthode d'essai.

8.2 Charge d'épreuve à 0,2 % ($R_{p0,2-0}$ et $R_{p0,2-U}$)

La charge d'épreuve à 0,2 % du composite est déterminée de deux manières d'après la partie de chargement initial et la partie de déchargement/rechargement de la courbe contrainte-déformation représentée à la Figure 1.

La charge d'épreuve à 0,2 % sous le chargement $R_{p0,2-0}$ doit être déterminée comme suit: la partie linéaire initiale de la ligne de chargement de la courbe contrainte-déformation est déplacée de 0,2 % le long de l'axe de déformation (ligne de décalage de 0,2 % durant le chargement) et le point d'intersection entre cette droite linéaire et la courbe contrainte-déformation doit être défini comme la charge d'épreuve à 0,2 % durant le chargement.

La charge d'épreuve à 0,2 % lors du déchargement $R_{p0,2-U}$ doit être déterminée comme suit: la partie linéaire initiale durant le déchargement est déplacée parallèlement au point de déformation décalé de 0,2 %. L'intersection de cette ligne avec la courbe contrainte-déformation détermine le point qui doit être défini comme la charge d'épreuve à 0,2 % sous déchargement.

Chaque charge d'épreuve à 0,2 % doit être calculée en utilisant la Formule (5):

$$R_{p0,2-i} = F_i / S_0 \quad (5)$$

où

$R_{p0,2-i}$ est la charge d'épreuve à 0,2 % en chaque point (MPa);

F_i est la force en chaque point (N);

S_0 est la surface de section originale de l'éprouvette (mm²);

i indique 0 ou U.

9 Incertitude de mesure

Sauf spécification contraire, les mesures doivent être effectuées dans la plage de températures comprise entre 285 K et 305 K. Une cellule de mesure de force avec une incertitude type relative inférieure à 0,1 %, valable entre zéro et la capacité de force maximale doit être utilisée. Il convient que l'incertitude type relative de déformation des extensomètres soit inférieure à 0,5 %. Il convient que l'incertitude type relative du capteur de mesure de déplacement (par exemple, un TDVL [transformateur différentiel à variable linéaire]) utilisé pour l'étalonnage soit inférieure à 0,1 %.

La valeur de l'incertitude type relative correspondant au nombre d'éprouvettes en essai des modules d'élasticité mesurés E_0 et E_U , et de charge d'épreuve $R_{p0,2-0}$ et $R_{p0,2-U}$ doit être calculée à l'aide de la Formule (6):

$$X_{RSU}(N) = X_{<COV>} / \sqrt{N} \quad (6)$$

où

$X_{RSU}(N)$ est la valeur de l'incertitude type relative;

N est le nombre d'éprouvettes en essai;

$X_{<COV>}$ est la valeur du coefficient de variation moyenné pour toutes les données soumises à essai.

Selon l'essai interlaboratoire international (voir Article A.7), le paramètre $X_{<COV>}$ a été évalué comme suit: 7,0 %, 4,6 %, 4,3 % et 4,1 % respectivement pour E_0 , E_U , $R_{p0,2-0}$ et $R_{p0,2-U}$.

Une évaluation de l'incertitude type composée pour le module d'élasticité est donnée à l'Annexe B.

10 Rapport d'essai

10.1 Eprouvette

- Nom du fabricant de l'éprouvette
- Classification et/ou symbole
- Numéro de lot
- Forme et dimension de la section du fil
- Matériaux comprenant le substrat et le stabilisateur

10.2 Résultats

Les résultats des propriétés mécaniques suivantes doivent être rapportés:

- Module d'élasticité (E_0 et E_U)
- Charges d'épreuve à 0,2 % ($R_{p0,2-0}$ et $R_{p0,2-U}$)

Annexe A (informative)

Informations complémentaires relatives aux Articles 1 à 10

A.1 Généralités

Le présent document est basé sur les mesures contrainte-déformation axiales à température ambiante. Les propriétés mécaniques dans le sens perpendiculaire (axe c) jouent également un rôle important dans la fabrication des dispositifs supraconducteurs; elles ne sont pas traitées dans ce document. Pour les bandes plus larges, les mesures contrainte-déformation biaxiales réalisées avec des jauges de contraintes biaxiales ne sont pas rares mais ces mesures sont également exclues du domaine d'application du présent document.

L'Annexe A fournit des informations de référence concernant les facteurs variables pouvant avoir une influence importante sur la méthode d'essai de traction, ainsi que certaines précautions à observer pour l'utilisation de ce document.

A.2 Extensomètre

A.2.1 Extensomètre double

Dans l'essai interlaboratoire international pour les bandes REBCO, un système d'extensomètre double composé de deux extensomètres simples était généralement utilisé pour enregistrer deux signaux destinés à être moyennés par un logiciel ou un signal déjà moyenné par le système d'extensomètre lui-même.

Des extensomètres doubles à faible masse perfectionnés types sont représentés sur les Figures A.1 et A.2.

Dimensions en millimètres

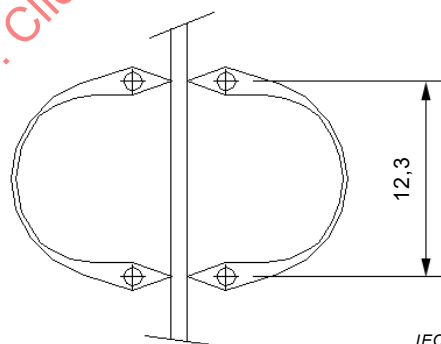
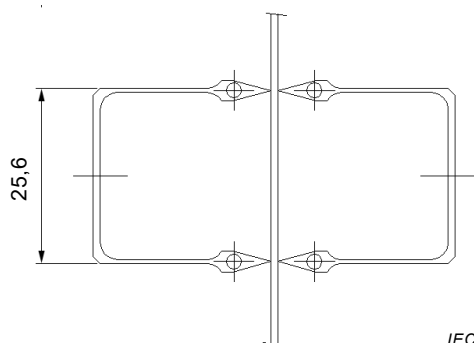


Figure A.1 – Extensomètre de type jumeau de Siam à faible masse

La Figure A.1 représente un extensomètre de type jumeau de Siam à faible masse avec une longueur entre repères de 12,3 mm (masse totale 0,5 g). Les deux extensomètres sont câblés ensemble en un extensomètre de type simple, moyennant ainsi électriquement les deux enregistrements de déplacement.

Dimensions en millimètres**Figure A.2 – Extensomètre double à faible masse**

La Figure A.2 représente un extensomètre double à faible masse avec une longueur entre repères de 25,6 mm (masse totale 3,0 g). Chacun des deux extensomètres est un extensomètre de type simple; il convient d'effectuer la moyenne à l'aide d'un logiciel.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61788-25:2018

A.2.2 Extensomètre simple

La Figure A.3 représente un extensomètre simple d'une masse totale de 30 g muni d'une masse d'équilibrage.

Dimensions en millimètres

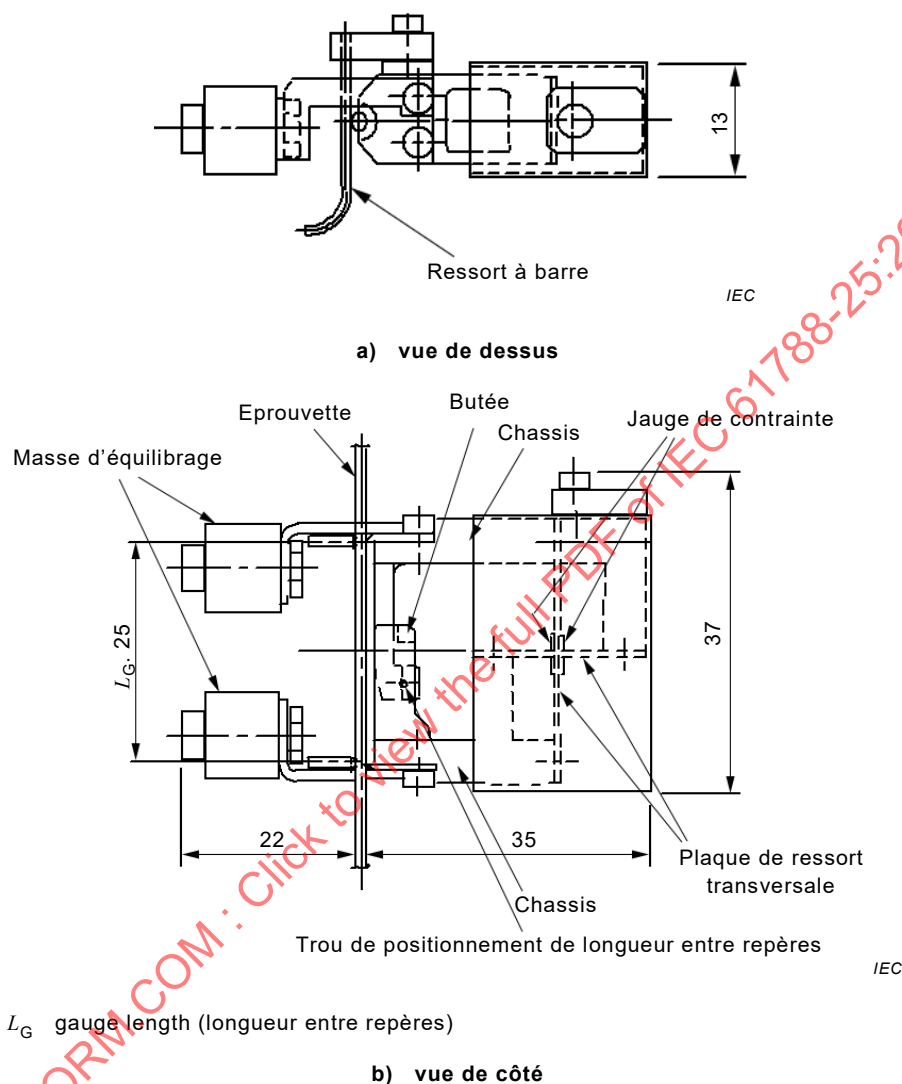


Figure A.3 – Exemple d'extensomètre muni d'une masse d'équilibrage et d'un axe d'éprouvette vertical

A.3 Limite élastique

La Figure 1 illustre le résultat de l'essai de traction à température ambiante pour un conducteur à revêtement REBCO. Les propriétés mécaniques sont généralement divisées en deux régions de déformation élastique et plastique. La limite élastique macroscopique est apparue à $R_{p0,2} = 682$ MPa. Lorsque la courbe contrainte-déformation est analysée avec précision, la pente laisse apparaître une légère variation qui commence juste après la limite élastique (el) au niveau du point P indiqué sur la Figure 1 b). La contrainte de traction et la déformation de traction à la limite élastique sont définies en principe comme correspondant à la transition entre déformation élastique et plastique, telle qu'indiquée à la Figure 1 b). La limite élastique de déformation se situe approximativement à $A_{el} = 0,05$ %. Cependant, leur détermination quantitative est difficile car la pente varie très progressivement.

A.4 Force de serrage

Une faible force de serrage a pour conséquence un glissement mais une force de serrage importante peut provoquer la rupture de la surface serrée. Il convient donc de régler la force de serrage avec soin. Un matériau d'amortissement tel que du papier abrasif peut être inséré pour empêcher les surfaces serrées de l'éprouvette de glisser et de se fracturer.

A.5 Pourcentage d'allongement après rupture (A_f)

La mesure d'allongement après rupture est nécessaire uniquement à titre de référence. Le mouvement de la traverse peut être utilisé pour rechercher la valeur approchée de l'allongement après rupture, au lieu d'utiliser la méthode d'aboutement. Pour utiliser cette méthode, il est nécessaire d'enregistrer la position de la traverse à la rupture. La formule suivante est utilisée pour obtenir l'allongement après rupture, donné en pourcentage.

$$A_f = 100 (L_f - L_o) / L_o \quad (\text{A.1})$$

où

A_f est le pourcentage d'allongement après rupture;

L_o est la distance intérieure initiale entre pinces;

L_f est la distance entre pinces après rupture.

A.6 Condition de déformation jusqu'à la rupture

Selon la description de l'Article 4, l'essai consiste à déformer une pièce d'essai au moyen d'une force de traction, généralement jusqu'à la rupture. En pratique, cependant, il est difficile de déformer correctement le spécimen jusqu'à la rupture, car le spécimen utilisé, avec une forme de bande équiparallèle, provoque souvent une rupture au serrage. La déformation d'essai jusqu'à la rupture n'est pas une condition d'essai obligatoire.

A.7 Incertitude type relative

Pour évaluer la qualité des données mesurées, le concept d'incertitude sert de fondement à une estimation indépendante [Guide ISO/IEC 98-3]. Dans le cas des bandes REBCO, un grand nombre d'informations ont été rassemblées au cours de l'essai interlaboratoire international effectué avec sept groupes de recherche [Osamura et al., 2014]. Quatre types de bandes supraconductrices REBCO disponibles dans le commerce ont été utilisés pour les spécimens d'essai, désignés par les lettres A à D dans le Tableau A.1. Leur caractéristique structurelle générale est telle que décrite ci-après. Une fine couche supraconductrice d'une épaisseur de 1 μm à 2,5 μm est déposée sur le substrat par le biais de couches d'oxyde intermédiaires. La surface de la couche supraconductrice est recouverte d'une fine couche d'Ag. Les feuilles métalliques d'une épaisseur de 40 μm à 100 μm sont laminées des deux côtés. Les données obtenues lors des cinq essais répétés pour chaque échantillon ont été rapportées par groupe individuel.

Tableau A.1 – Incertitude type relative (X_{RSU}) et coefficient de variation ($X_{\text{<COV>}}$) pour les données expérimentales de E_0 et E_U

Echantillon	N^a	E_0		E_U	
		X_{RSU} (%)	$X_{\text{<COV>}}$ (%)	X_{RSU} (%)	$X_{\text{<COV>}}$ (%)
A	32	1,27	7,2	0,70	3,7
B	32	1,96	11,1	0,92	5,3
C	35	0,72	4,2	0,83	4,9
D	35	0,91	5,4	0,78	4,6

^a N est le nombre total d'expériences acceptées après l'essai de qualification.

Comme indiqué au 8.1, les données ont été confiées à l'essai de qualification, où $\Delta = 0,2$ a été utilisé. Le nombre de données expérimentales disponibles pour l'analyse successive a été répertorié dans le Tableau A.1. Par exemple, toutes les données ($N = 35$) ont été qualifiées pour les bandes C et D, mais trois d'entre elles n'ont pas été qualifiées pour les bandes A et B.

La valeur moyenne du module est donnée par la Formule (A.2),

$$\langle E_j \rangle = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N E_j(i) \quad (\text{A.2})$$

où j indique 0 ou U. L'incertitude type relative (X_{RSU}) a ensuite été évaluée à partir de la Formule (A.3),

$$X_{\text{RSU}_j} = \frac{100}{\langle E_j \rangle} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (E_j(i) - \langle E_j \rangle)^2}{N(N-1)}} \quad (\text{A.3})$$

Les résultats évalués sont répertoriés dans le Tableau A.1. En outre, la valeur de l'incertitude type relative est reliée à la valeur du coefficient de variation ($X_{\text{<COV>}}$) par la Formule (A.4),

$$X_{\text{RSU}_j} = \frac{X_{\text{<COV}_j}}{\sqrt{N}} \quad (\text{A.4})$$

Quand les valeurs de X_{RSU_j} et N sont connues, celle de $X_{\text{<COV>}}$ peut être obtenue selon les indications du Tableau A.1.

De la même manière, les informations statistiques relatives à la charge d'épreuve à 0,2 % ont été évaluées comme répertorié dans le Tableau A.2.