

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Wind turbines –
Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades

Éoliennes –
Partie 23: Essais en vraie grandeur des structures des pales de rotor

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61400-23:2014



THIS PUBLICATION IS COPYRIGHT PROTECTED

Copyright © 2014 IEC, Geneva, Switzerland

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

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

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

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

About the IEC

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

About IEC publications

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

IEC Catalogue - webstore.iec.ch/catalogue

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

IEC publications search - www.iec.ch/searchpub

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

The world's leading online dictionary of electronic and electrical terms containing 20 000 terms and definitions in English and French, with equivalent terms in 16 additional languages. Also known as the International Electrotechnical Vocabulary (IEV) online.

IEC Glossary - std.iec.ch/glossary

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

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

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

A propos de l'IEC

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

A propos des publications IEC

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

Catalogue IEC - webstore.iec.ch/catalogue

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

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

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

IEC Just Published - webstore.iec.ch/justpublished

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

Electropedia - www.electropedia.org

Le premier dictionnaire en ligne de termes électroniques et électriques. Il contient 20 000 termes et définitions en anglais et en français, ainsi que les termes équivalents dans 16 langues additionnelles. Egalement appelé Vocabulaire Electrotechnique International (IEV) en ligne.

Glossaire IEC - std.iec.ch/glossary

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

Service Clients - webstore.iec.ch/csc

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

INTERNATIONAL STANDARD

NORME INTERNATIONALE



Wind turbines –

Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades

Éoliennes –

Partie 23: Essais en vraie grandeur des structures des pales de rotor

INTERNATIONAL
ELECTROTECHNICAL
COMMISSION

COMMISSION
ELECTROTECHNIQUE
INTERNATIONALE

ICS 27.180

ISBN 978-2-8322-4924-6

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.....	5
INTRODUCTION.....	7
1 Scope.....	8
2 Normative references	8
3 Terms and definitions	9
4 Notation.....	12
4.1 Symbols.....	12
4.2 Greek symbols.....	12
4.3 Subscripts.....	12
4.4 Coordinate systems	12
5 General principles	13
5.1 Purpose of tests.....	13
5.2 Limit states	14
5.3 Practical constraints	14
5.4 Results of test.....	14
6 Documentation and procedures for test blade.....	15
7 Blade test program and test plans	16
7.1 Areas to be tested.....	16
7.2 Test program	16
7.3 Test plans.....	16
7.3.1 General	16
7.3.2 Blade description.....	16
7.3.3 Loads and conditions.....	17
7.3.4 Instrumentation.....	17
7.3.5 Expected test results.....	17
8 Load factors for testing.....	17
8.1 General.....	17
8.2 Partial safety factors used in the design.....	17
8.2.1 General	17
8.2.2 Partial factors on materials	17
8.2.3 Partial factors for consequences of failure	18
8.2.4 Partial factors on loads	18
8.3 Test load factors	18
8.3.1 Blade to blade variation	18
8.3.2 Possible errors in the fatigue formulation.....	18
8.3.3 Environmental conditions.....	19
8.4 Application of load factors to obtain the target load	19
9 Test loading and test load evaluation.....	20
9.1 General.....	20
9.2 Influence of load introduction	20
9.3 Static load testing	20
9.4 Fatigue load testing	21
10 Test requirements.....	22
10.1 General.....	22
10.1.1 Test records	22
10.1.2 Instrumentation calibration.....	22

10.1.3	Measurement uncertainties	22
10.1.4	Root fixture and test stand requirements	22
10.1.5	Environmental conditions monitoring	22
10.1.6	Deterministic corrections	23
10.2	Static test	23
10.2.1	General	23
10.2.2	Static load test.....	23
10.2.3	Strain measurement	24
10.2.4	Deflection measurement	24
10.3	Fatigue test.....	24
10.4	Other blade property tests	24
10.4.1	Blade mass and center of gravity.....	24
10.4.2	Natural frequencies	25
10.4.3	Optional blade property tests	25
11	Test results evaluation.....	25
11.1	General.....	25
11.2	Catastrophic failure.....	25
11.3	Permanent deformation, loss of stiffness or change in other blade properties	26
11.4	Superficial damage	26
11.5	Failure evaluation	26
12	Reporting	26
12.1	General.....	26
12.2	Test report content.....	27
12.3	Evaluation of test in relation to design requirements	27
Annex A (informative)	Guidelines for the necessity of renewed static and fatigue testing	28
Annex B (informative)	Areas to be tested	29
Annex C (informative)	Effects of large deflections and load direction	30
Annex D (informative)	Formulation of test load	31
D.1	Static target load.....	31
D.2	Fatigue target load.....	31
D.3	Sequential single-axial, single location.....	34
D.4	Multi axial single location	34
Annex E (informative)	Differences between design and test load conditions.....	36
E.1	General.....	36
E.2	Load introduction	36
E.3	Bending moments and shear.....	36
E.4	Flapwise and lead-lag combinations.....	36
E.5	Radial loads.....	37
E.6	Torsion loads	37
E.7	Environmental conditions	37
E.8	Fatigue load spectrum and sequence	37
Annex F (informative)	Determination of number of load cycles for fatigue tests	38
F.1	General.....	38
F.2	Background	38
F.3	The approach used	38
Bibliography		43

Figure 1 – Chordwise (flatwise, edgewise) coordinate system	13
Figure 2 – Rotor (flapwise, lead-lag) coordinate system	13
Figure C.1 – Applied loads effects due to blade deformation and angulation	30
Figure D.1 – Polar plot of the load envelope from a typical blade	31
Figure D.2 – Design FSF	33
Figure D.3 – Area where design FSF is smaller than 1,4 (critical area)	33
Figure D.4 – $rFSF$ and critical areas, sequential single-axial test	34
Figure D.5 – $rFSF$ and critical area, multi axial test	35
Figure E.1 – Difference of moment distribution for target and actual test load	36
Figure F.1 – Simplified Goodman diagram	39
Figure F.2 – Test load factor γ_{ef} for different number of load cycles in the test	42
Table 1 – Recommended values for γ_{ef} for different number of load cycles	18
Table A.1 – Examples of situations typically requiring or not requiring renewed testing	28
Table F.1 – Recommended values for γ_{ef} for different number of load cycles	38
Table F.2 – Expanded recommended values for γ_{ef} for different number of load cycles	41

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61400-23:2014

INTERNATIONAL ELECTROTECHNICAL COMMISSION

WIND TURBINES –

Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades

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 61400-23 has been prepared by IEC technical committee 88: Wind turbines.

This bilingual version (2019-01) corresponds to the monolingual English version, published in 2014-04.

This first edition cancels and replaces IEC TS 61400-23, published in 2001. It constitutes a technical revision.

This edition includes the following significant technical changes with respect to IEC TS 61400-23:

- a) description of load based testing only;
- b) condensation to describe the general principles and demands.

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

CDV	Report on voting
88/420/CDV	88/448/RVC

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

The French version of this standard has not been voted upon.

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

A list of all parts in the IEC 61400 series, published under the general title *Wind turbines*, can be found on the IEC website.

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

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

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

INTRODUCTION

The blades of a wind turbine rotor are generally regarded as one of the most critical components of the wind turbine system. In this standard, the demands for full-scale structural testing related to certification are defined as well as the interpretation and evaluation of test results.

Specific testing methods or set-ups for testing are not demanded or included as full-scale blade testing methods historically have developed independently in different countries and laboratories.

Furthermore, demands for tests determining blade properties are included in this standard in order to validate some vital design assumptions used as inputs for the design load calculations.

Any of the requirements of this standard may be altered if it can be suitably demonstrated that the safety of the system is not compromised.

The standard is based on IEC TS 61400-23 published in 2001. Compared to the TS, this standard only describes load based testing and is condensed to describe the general principles and demands.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61400-23:2014

WIND TURBINES –

Part 23: Full-scale structural testing of rotor blades

1 Scope

This part of IEC 61400 defines the requirements for full-scale structural testing of wind turbine blades and for the interpretation and evaluation of achieved test results. The standard focuses on aspects of testing related to an evaluation of the integrity of the blade, for use by manufacturers and third party investigators.

The following tests are considered in this standard:

- static load tests;
- fatigue tests;
- static load tests after fatigue tests;
- tests determining other blade properties.

The purpose of the tests is to confirm to an acceptable level of probability that the whole population of a blade type fulfils the design assumptions.

It is assumed that the data required to define the parameters of the tests are available and based on the standard for design requirements for wind turbines such as IEC 61400-1 or equivalent. Design loads and blade material data are considered starting points for establishing and evaluating the test loads. The evaluation of the design loads with respect to the actual loads on the wind turbines is outside the scope of this standard.

At the time this standard was written, full-scale tests were carried out on blades of horizontal axis wind turbines. The blades were mostly made of fibre reinforced plastics and wood/epoxy. However, most principles would be applicable to any wind turbine configuration, size and material.

2 Normative references

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

IEC 60050-415:1999, *International Electrotechnical Vocabulary – Part 415: Wind turbine generator systems*

IEC 61400-1:2005, *Wind turbines – Part 1: Design requirements*

ISO/IEC 17025:2005, *General requirements for the competence of testing and calibration laboratories*

ISO 2394:1998, *General principles on reliability for structures*

3 Terms and definitions

For the purposes of this document, the terms and definitions related to wind turbines or wind energy given in IEC 60050-415 and the following apply.

3.1

actuator

device that can be controlled to apply a constant or varying force and displacement

3.2

blade root

that part of the rotor blade that is connected to the hub of the rotor

3.3

blade subsystem

integrated set of items that accomplishes a defined objective or function within the blade (e.g., lightning protection subsystem, aerodynamic braking subsystem, monitoring subsystem, aerodynamic control subsystem, etc.)

3.4

buckling

instability characterized by a non-linear increase in out of plane deflection with a change in local compressive load

3.5

chord

length of a reference straight line that joins the leading and trailing edges of a blade aerofoil cross-section at a given spanwise location

3.6

constant amplitude loading

during a fatigue test, the application of load cycles with a constant amplitude and mean value

3.7

creep

time-dependant increase in strain under a sustained load

3.8

design loads

loads the blade is designed to withstand, including appropriate partial safety factors

3.9

edgewise

direction that is parallel to the local chord

SEE: 4.4.

3.10

elastic axis

the line, lengthwise of the blade, along which transverse loads are applied in order to produce bending only, with no torsion at any section

Note 1 to entry: Strictly speaking, no such line exists except for a few conditions of loading. Usually the elastic axis is assumed to be the line that passes through the elastic center of every section. This definition is not applicable for blades with bend-twist coupling.

3.11

fatigue formulation

methodology by which the fatigue life is estimated

3.12

fatigue test

test in which a cyclic load of constant or varying amplitude is applied to the test specimen

3.13

fixture

component or device to introduce loads or to support the test specimen

3.14

flapwise

direction that is perpendicular to the surface swept by the undeformed rotor blade axis

SEE: 4.4.

3.15

flatwise

direction that is perpendicular to the local chord, and spanwise blade axis

SEE: 4.4.

3.16

full-scale test

test carried out on the actual blade or part thereof

3.17

inboard

towards the blade root

3.18

lead-lag

direction that is parallel to the plane of the swept surface and perpendicular to the longitudinal axis of the undeformed rotor blade

SEE 4.4.

3.19

load envelope

collection of maximum design loads in all directions and spanwise positions

3.20

natural frequency

eigen frequency

frequency at which a structure will vibrate when perturbed and allowed to vibrate freely

3.21

partial safety factors

factors that are applied to loads and material strengths to account for uncertainties in the representative (characteristic) values

3.22

prebend

blade curvature in the flapwise plane in the unloaded condition

3.23

R-value

ratio between minimum and maximum value during a load cycle

3.24**S-N formulation**

method used to describe the stress and/or strain (S) vs. cycle (N) characteristics of a material, component or structure

3.25**spanwise**

direction parallel to the longitudinal axis of a rotor blade

3.26**static test**

test with an application of a single load cycle without introducing dynamic effects

3.27**stiffness**

ratio of change of force to the corresponding change in displacement of an elastic body

3.28**strain**

ratio of the elongation (or shear displacement) of a material subjected to stress to the original length of the material

3.29**sweep**

blade curvature in the lead-lag plane in the unloaded condition

3.30**tare loads**

gravitational or other loads that are inherent to the test set-up

3.31**target load**

load that is developed from the design load and is the ideal test load

3.32**test load**

forces applied during a test

3.33**tested area**

region of the test object that experiences the intended loading

3.34**twist**

spanwise variation in angle of the chord lines of blade cross-sections

3.35**variable amplitude loading**

application of load cycles of non-constant mean and/or cyclic range

3.36**whiffle tree**

device for distributing a single load source over multiple points on a test specimen

4 Notation

4.1 Symbols

C	conversion factors for material strength
D	theoretical damage
F	load
F_a	flatwise shear force (chordwise co-ordinates)
F_b	edgewise shear force (chordwise co-ordinates)
F_c	spanwise (tensile) force (chordwise co-ordinates)
F_x	flapwise shear force (rotor co-ordinate system)
F_y	lead-lag shear force (rotor co-ordinate system)
F_z	spanwise (tensile) force (rotor co-ordinate system)
M_a	edgewise bending moment (chordwise co-ordinates)
M_b	flatwise bending moment (chordwise co-ordinates)
M_c	blade torsion moment (chordwise co-ordinates)
M_x	lead-lag bending moment (rotor co-ordinate system)
M_y	flapwise bending moment (rotor co-ordinate system)
M_z	blade torsion moment (rotor co-ordinate system)
N	cycle
S	strain or stress

4.2 Greek symbols

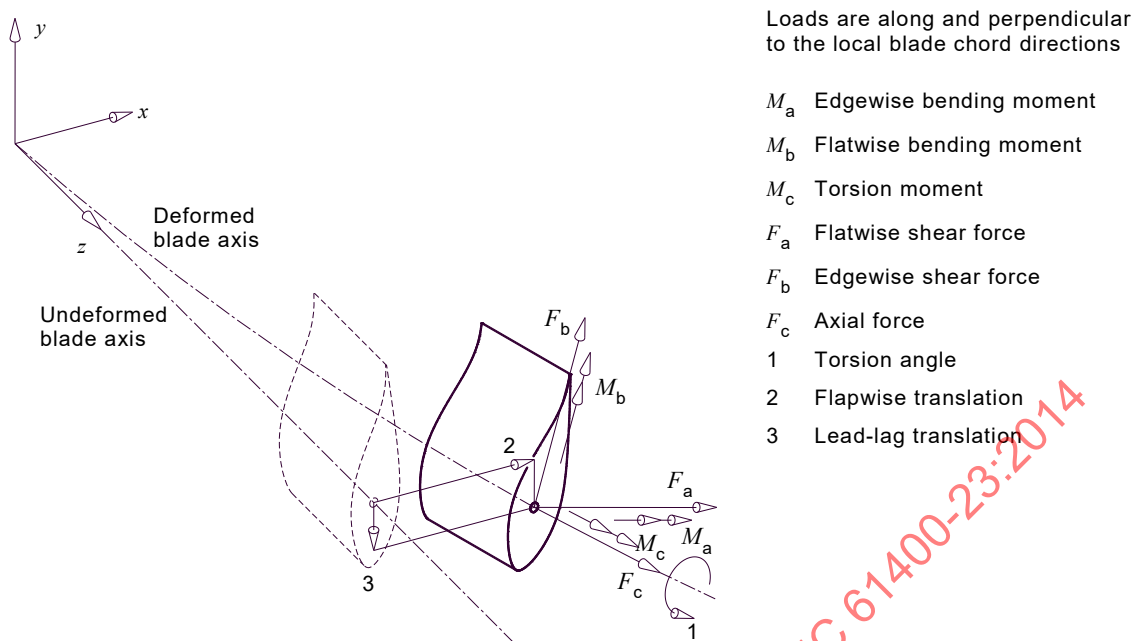
γ	partial factor or test load factor
σ	applied stress or strain

4.3 Subscripts

design	design loading conditions
df	design load: fatigue
du	design load: static
ef	uncertainty in fatigue formulation of test load
f	load
lf	environmental effects: fatigue
lu	environmental effects: static
m	material
n	consequence of failure
nf	consequence of failure: fatigue
nu	consequence of failure: static
sf	blade to blade variation: fatigue test load
su	blade to blade variation: static test load
target	target loading conditions
test	test loading conditions

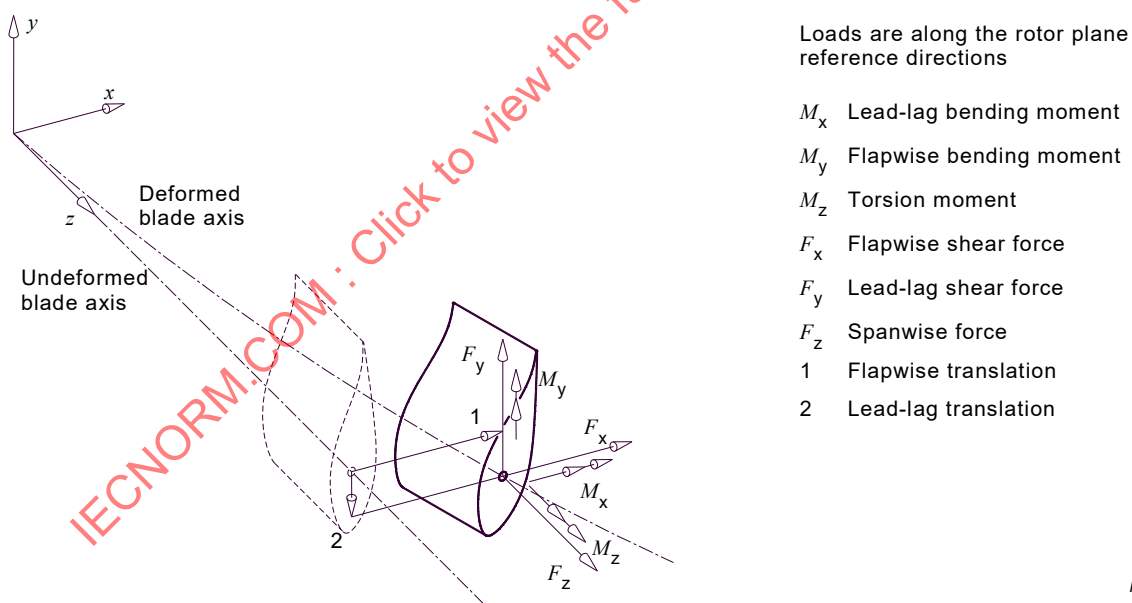
4.4 Coordinate systems

Two different coordinate systems may be used for reference during structural testing. The first, shown in Figure 1, references the local blade chord directions. The second, shown in Figure 2, references the global rotor plane directions.



IEC

Figure 1 – Chordwise (flatwise, edgewise) coordinate system



IEC

Figure 2 – Rotor (flapwise, lead-lag) coordinate system

5 General principles

5.1 Purpose of tests

The fundamental purpose of a wind turbine blade test is to demonstrate to a reasonable level of certainty that a blade type, when manufactured according to a certain set of specifications, has the prescribed reliability with reference to specific limit states, or, more precisely, to verify that the specified limit states are not reached and the blades therefore possess the load carrying capability and service life provided for in the design.

Additionally, tests determining blade properties have to be performed in order to validate some vital design assumptions used as inputs for the design load calculations. It has to be pointed out that the required blade property tests do not cover all design assumptions.

Normally, the full-scale tests dealt within this standard are tests on a limited number of samples; only one or two blades of a given design are tested, so no statistical distribution of production blade load carrying capability can be obtained. Although the tests do give information valid for the blade type, they cannot replace either a rigorous design process or the quality system for series blade production. Furthermore, the tests described in this standard are not intended to be used for the testing of mechanism function nor to establish basic material strength or fatigue design data for blades and/or components.

5.2 Limit states

To establish and evaluate the test load, a certain amount of information about the design shall be known. Usually the blades are designed according to some standard or code of practice such as IEC 61400-1 that uses the principles of ISO 2394 defining the limit states and partial coefficients, which have to be applied to obtain the corresponding design values. A limit state is a state of the structure and the loads acting upon it, beyond which the structure no longer satisfies the design requirements. The partial coefficients reflect uncertainties and are chosen – at least in principle – in order to keep the probability of a limit state being reached below a certain value prescribed for the structure. According to this, a blade should pass the test if the limit state is not reached when the blade is exposed to the test load, representative of the design load.

The basis for establishing the test loads is the entire envelope of blade design loads, derived according to IEC 61400-1 or equivalent. The representative test load can be higher than the design load to account for other influences, for example, environmental effects, test uncertainties, and variations in production (see Clause 8).

The determination of the actual margins to the limit states might be desirable because such margins can provide a measure of the actual safety obtained for the resistance of the test blade. However, interpretation of such values is not straightforward and probabilistic methods have to be applied. In this standard, only the ultimate limit state and fatigue are dealt with.

5.3 Practical constraints

The practical execution of the tests is subject to many constraints of a technical and economic character. Some of the most important are listed below:

- the distributed load on the blade can be simulated only approximately;
- the time available for testing is generally one year or less;
- only one or a few blades can be tested;
- certain failures are difficult to detect.

The test will be a compromise because these constraints have to be dealt with in such a way that the final test results can be used for evaluation of the defined limit states.

As regards the interpretation of the results, it should be borne in mind that the blade used for testing will normally be one of the first blades from series production which will be subject to evolutionary modifications. Even minor modifications could compromise the validity of the tests (see Annex A).

5.4 Results of test

The design loads form the basis of the test loading. According to the design calculation, the blade shall be able to survive the design loading. In these design calculations, a number of assumptions are implicitly being made:

- the stresses or strains are calculated accurately or conservatively estimated;
- the classifications of strength and fatigue resistance of all relevant materials and details are estimated accurately or conservatively;
- the strength and fatigue formulations used to calculate the strength are accurate or conservative;
- the production is according to the design.

In a full-scale test used as final design verification, the validity of the assumptions mentioned above are checked simultaneously. When a blade fails during testing, at least one of these assumptions has been violated, although without further analysis it might not be clear what caused this unexpected failure.

If no damage to the blade has occurred during the test and the blade structure and the test loading has been evaluated correctly, this gives a strong indication that the blade design will fulfil its requirements. It should be noted that the blade property tests make it possible to check some of the main design assumptions used for the design calculations.

6 Documentation and procedures for test blade

The blade manufacturer shall record traceable documentary evidence for the design and construction of the test blade. The records should cover:

- unique identification;
- relevant drawings and specifications;
- lamination plans and work instructions;
- listing of manufacturer, type and identification number for all important materials used;
- supplier's certificate and blade manufacturer's laboratory acceptance report for all important materials used;
- curing history thermographs for thermosetting resins and adhesives at critical locations;
- differential scanning calorimetry or other control of curing;
- manufacturing quality record sheets signed by responsible person;
- weight and balance report detailing total mass and centre of gravity. This report shall include information about any loose items fitted during weighing e.g., root joint elements and damper fluids;
- relevant reports on manufacturing deviations.

Repairs shall also be documented. The records should cover the above list. Repairs may be:

- representative examples for repair procedures for manufacturing defects and in-service damage that are qualified with the test blade;
- repairs performed due to damage caused by test loads higher than the target loads (see 9.3 and 9.4).

Special blade modifications can be present for test purposes. During the fatigue tests the loads may have to be magnified to complete the test within an acceptable time-frame. In some cases, the required magnification of the fatigue loads may lead to failure of areas not considered to be tested. In these cases, special blade modifications can be considered. Modification might also be due to load introduction reinforcements. All special blade modifications shall be documented.

7 Blade test program and test plans

7.1 Areas to be tested

No single test can load the whole blade optimally. All critical areas should be loaded at a minimum to the target loads. These areas are discussed in Annex B. Lead-lag and flap tests may be sufficient – but that shall be evaluated (see Annex D).

7.2 Test program

The test program for a blade type shall be composed of at least the following tests in this order:

- mass, centre of gravity and natural frequencies (see 10.4.1 and 10.4.2);
- static tests (see 9.3 and 10.2);
- fatigue load tests (see 9.4 and 10.3);
- post fatigue static tests.

Testing of other blade properties could be of interest (see 10.4.3).

All tests in a given direction and in a given area of a blade shall be performed on the same blade part. The flap and lead-lag sequence of testing may be performed on two separate blades. However, if an area of the blade is critical due to the combination of flap and lead-lag loading, then the entire test sequence shall be performed on one blade.

The test program shall include blade inspection (see Clause 11).

7.3 Test plans

7.3.1 General

Test plans shall be established for all the individual tests in the blade test program. The test plans shall include a blade description, specification of loads, conditions and the instrumentation to be applied in the test.

7.3.2 Blade description

The blade description in the test plan shall be sufficient to ensure that the blade will fit the test stand and avoid unintended overloading during storage, handling, lifting, mounting and testing in the laboratory.

The following information shall be supplied:

- blade geometry (preferably in form of a drawing):
 - blade length;
 - chord and twist distribution;
 - pre-bend or sweep;
- mass and center of gravity;
- blade surface condition;
- blade mounting details:
 - bolt pattern (including tolerances) and interface dimension;
 - bolt size, type and grade;
 - bolt clamping length;
 - bolt pretension or torque procedure;

- lifting and handling procedures;
- maximum expected deflections under load;
- profile geometry at load introduction points.

Additional information (such as mounting structure stiffness) may be required depending on the test specifics.

7.3.3 Loads and conditions

The test plan shall include the target loads, test loads, application methods and sequence of the tests to be conducted. Environmental conditions that may affect the execution of the tests shall also be given in the test plan (see 8.3.3).

7.3.4 Instrumentation

The position and orientation of load cells, strain gauges, deflection transducers and other sensors shall be specified in the test plan.

7.3.5 Expected test results

It is recommended that predictions (deflections, strains, etc.) are provided corresponding to all sensor measurements to enable and assist planning, evaluation and quality control.

8 Load factors for testing

8.1 General

In testing, various load factors have to be taken into account. Those arising from the design are discussed in 8.2. Apart from these, additional test load factors have to be applied to account for effects introduced by the test methodology. These test load factors are discussed in 8.3.

8.2 Partial safety factors used in the design

8.2.1 General

In the design calculations, partial safety factors (or coefficients) have to be included. According to IEC 61400-1, these include:

- γ_m : partial material factors;
- γ_n : partial factors for consequences of failure;
- γ_f : partial load factors.

In the design calculation, all three partial safety factors (γ_m , γ_n and γ_f) have to be applied. The product of these partial factors is an important figure for the overall safety level of the design. For the test load, only γ_f and γ_n will affect the test load for reasons given in the following subclauses.

8.2.2 Partial factors on materials

Material data are normally based on tests of coupons produced and tested under laboratory conditions.

Material conversion factors take into account specific differences between the conditions of the material in the structure and the conditions for which the strength and fatigue formulation were derived. Examples of these conversion factors are factors for size effects, humidity, aging and temperature. These will be applied implicitly using the appropriate strength and fatigue formulation during the evaluation.

The partial factor for materials, γ_m , is applied in the design to account for uncertainties in the conversion factors and the possibility of unfavorable deviations of the material properties from the characteristic values. The test loads should not be increased by this partial factor (γ_m) because the material in the blade being tested is the actual material.

8.2.3 Partial factors for consequences of failure

The partial factors for consequences of failure, γ_n , according to IEC 61400-1, are factors by which the importance of the structure and the consequences of failure, including the significance of the type of failure, are taken into account.¹ The reason is that for a non-fail-safe component (such as a blade) a higher level of safety against failure is required than for a fail-safe component. In this case, the full-scale test shall reflect this additional safety requirement. As a consequence, these factors shall be included in the test load.

8.2.4 Partial factors on loads

During the design, the partial factors on loads γ_f take into account the uncertainties in the loads. Therefore, the test blade shall be able to resist the design load (which includes the appropriate partial factors for loads).

8.3 Test load factors

8.3.1 Blade to blade variation

If there is no failure probability distribution data available for the particular blade design and particular manufacturing procedure, the following test load factors shall be used:

for static tests: $\gamma_{su} = 1,1$

for fatigue tests: $\gamma_{sf} = 1,1$

The static load factor above shall be used for at least one of the two required static tests (pre or post fatigue). For the other static test, γ_{su} can be set to 1,0.

8.3.2 Possible errors in the fatigue formulation

Due to the conversion of the original fatigue design loads to fatigue test loads, an uncertainty is introduced due to possible errors in the fatigue formulation.

The more the fatigue test is accelerated, i.e. the lower the number of cycles in the fatigue test, the larger the uncertainty connected to the conversion from the fatigue design loads to the fatigue test loads.

For fatigue tests, this shall be accounted for by applying the factor γ_{ef} to the fatigue test loads. The value of γ_{ef} is given for different numbers of test load cycles in the Table 1 below (see Annex F).

Table 1 – Recommended values for γ_{ef} for different number of load cycles

Number of load cycles	γ_{ef}
5×10^5	1,065
1×10^6	1,050
$2,5 \times 10^6$	1,035
5×10^6	1,025
1×10^7	1,015

¹ In some codes, this is taken into account by applying different partial factors on loads.

For fatigue tests using a number of load cycles different from those given in the table above, γ_{ef} is either conservatively selected or found by interpolation or extrapolation.

8.3.3 Environmental conditions

In general, the conditions at the test facility are more benign than the actual operational and consequently design conditions. In many strength and fatigue formulations, the effect of these conditions is expressed by factors. However, it can also result in different strength or fatigue formulation for the different conditions.

When the test conditions are more benign, this leads to a magnification of the required test load. The appropriate factor has to be checked by the evaluation of the test load distribution, but for both conditions the appropriate strength or fatigue formulation has to be applied (see Annex E). Whenever the effect is given by factors, these can be used as an initial estimate for the factor necessary to magnify the load to arrive at an equivalent test load.

8.4 Application of load factors to obtain the target load

For the tests, the design load is compiled into a target load. The test load should ideally be equivalent to the target load. The determination of the target loads shall be based on appropriate strength and/or fatigue formulations and elastic properties for the materials used in the areas to be tested.

The target load for the static test is defined as:

$$F_{\text{target-u}} = F_{\text{du}} \cdot \gamma_{\text{nu}} \cdot \gamma_{\text{su}} \cdot \gamma_{\text{lu}} \quad (1)$$

where

- $F_{\text{target-u}}$ is the target loading;
- F_{du} is the design loading (including partial factor for loads γ_f) (see 8.2.1);
- γ_{nu} is the partial factor for consequence of failure (see 8.2.3);
- γ_{su} is the test load factor for blade to blade variation (see 8.3.1);
- γ_{lu} is the test load factor for environmental effects, if applicable (see 8.3.3).

The target load for the fatigue test is defined as:

$$F_{\text{target-f}} = F_{\text{df}} \cdot \gamma_{\text{nf}} \cdot \gamma_{\text{sf}} \cdot \gamma_{\text{ef}} \cdot \gamma_{\text{lf}} \quad (2)$$

where

- $F_{\text{target-f}}$ is the target loading;
- F_{df} is the damage equivalent design loading (including partial factor for loads γ_f) (see 8.2.1);
- γ_{nf} is the partial factor for consequence of failure (see 8.2.3);
- γ_{sf} is the test load factor for blade to blade variation (see 8.3.1);
- γ_{ef} is the test load factor for errors in the fatigue formulation (see 8.3.2);
- γ_{lf} is the test load factor for environmental effects, if applicable. Alternatively the environmental effects can be accounted for in the conversion from design loads to damage equivalent design loads, if applicable (see 8.3.3).

The determination of the damage equivalent design loads for fatigue includes appropriate S-N formulation(s), cycle counting procedures, an appropriate damage summation model, R-value effects, and all other relevant information.

9 Test loading and test load evaluation

9.1 General

For each test, the target loads shall be defined in the test plan. Sufficient information shall be provided to allow the test load to be accurately assessed against the target load. In principle, the six load components should be given, including phase and frequency information required to generate combined load cases. In reality, the load components lead-lag and flapwise moments are the far most important components. Lead-lag and flapwise shear loads will normally implicitly be taken care of because of the moments. Only for more specialized blades will the torsion and lengthwise forces have to be taken into account. The coordinate system relevant for the load components shall be clearly specified (see 4.4). The large deflections of the blade during testing typically lead to changes in load direction with magnitude (see Annex C). Effects of changes in load direction shall be carefully considered when preparing the test plans and reports and when estimating uncertainties according to 10.1.3.

Since the test should prove that the blade can survive the target loading, the test loading shall be evaluated. It should be checked in which areas of the blade the severity of the test loading is indeed equal to or more severe than the target loading. Because the severity of the test loading compared to the target loading will vary over the blade area, in principle the evaluation has to be done at all locations of the blade area that are to be tested. Some examples of test evaluation are presented in Annex D.

Loads on critical mechanical and electrical blade subsystems, such as tip brakes and lightning protection components, are often different in character from the general loads on the blades and may need extra specification and specific tests. In the case of mechanisms, it is unlikely that sufficient loading conditions will be present in the standard tests to qualify the subsystem integrity. Additional testing may be necessary to simulate special case loading, including torsion and radial loading. For systems whose failure may result in unsafe operation of the turbine, special consideration shall be given to verify the appropriate level of structural integrity. The accumulated damage should not cause functional failure of these subsystems. Loads for testing of blade subsystems are not covered further in this standard.

9.2 Influence of load introduction

In the case where the test load is introduced as concentrated forces at a restricted number of locations (e.g. at actuator positions), the sections where the load is applied are disturbed and may be strengthened over a certain area by the load introduction fixtures. Therefore, at these areas the blade may not be properly tested and should not be considered in the analysis or evaluation. The length (in the longitudinal direction) of the disturbed area can be estimated from calculations or measurements.

Without further analysis, it could be assumed that this affected area might extend as much as three quarters of the chord length on either side of the fixture. In saddle design, special attention should be given to buckling sensitive areas (e.g. trailing edge in compression).

Also, if special modifications are made for test purposes (see Clause 6), the above-mentioned considerations are relevant.

9.3 Static load testing

In static load testing, the area to be tested shall be loaded to each of its most severe design load conditions while taking into account the variations in a population of manufactured blades and differences between the laboratory and the design environmental conditions (see 8.3.1 and 8.3.3).

If different load distributions or orientations are needed to represent the different extreme load cases in the areas to be tested, each of these shall be applied. For discussion of load directions, see Clause D.1.

It should be noted that the blade may be most vulnerable to certain failure modes when a resultant load, which is not necessarily the highest in magnitude, is appropriately applied in a particular direction. For each load the blade shall withstand the maximum load for the specified load duration. Since most common blade materials exhibit a reduction of strength with duration of load, the duration of the test load shall be at least as long as the peak design load. If the design load information provides a well-defined duration for the peak load on the blade, the test load and duration shall be based directly on that. If no duration of constant test load is stated, then 10 s shall be the minimum value.

In general all locations will be regarded as sufficiently tested if the loading during the static load test is equal to or higher than the target load. In case of failures caused by loads higher than target loads, repair is allowed before a fatigue test.

If the blade is tested with combined loading, it is not intended to combine maximum load in one direction with maximum load in the other direction. Instead, the maximum load in one direction should be combined with an appropriate load in the other direction.

9.4 Fatigue load testing

On the areas to be tested, a test loading has to be generated giving a fatigue damage equivalent to the fatigue damage caused by the target loads. The fatigue test loads will generally be chosen in such a way that, for practical reasons, the test time is reduced. To test areas around the whole blade cross-section, various combinations of flatwise and edgewise loading may be employed.

To reduce the number of cycles during the test, the load normally has to be increased to obtain a reasonable compromise between testing as realistically as possible and obtaining a more reasonable testing time.

The magnification shall lead to the appropriate theoretical equivalent fatigue damage accumulation, having the following limitations in mind:

- the maximum values of the stresses or strains might surpass the static strength of the material and consequently lead to static damage or failure;
- the stresses or strains may be so high that the usual assumption of the linearity between forces and stresses no longer applies, such as in the case of buckling;
- internal heating of the highly stressed areas.

Especially in the case of variable amplitude loading, these limits can be reached at a relatively low load magnification factor. In that case, only the intermediate load cycles can be increased further, and the test loading becomes more and more a constant-amplitude loading as a consequence.

The mean loads applied during fatigue testing shall normally be as close as possible to the mean load at the operating conditions that are most severe to the fatigue strength.

Locations will be regarded as sufficiently tested if the theoretical damage (e.g. Miner summation) during the fatigue test is equal to or higher than the theoretical damage based on the target load.

The theoretical test damage can be evaluated by accumulation of the damage from all partial tests.

When a certain area of the blade fails after it has been subjected to theoretical damage due to the test load that is equivalent to or higher than the damage due to the target load, that area has passed the test. In principle, testing of the blade can continue to reach equal severity for the other areas. This is only valid for the areas that are not affected by stress redistribution due to the damage.

In case of failures caused by loads higher than target loads, repair is allowed. The consequences of any repairs shall be evaluated.

10 Test requirements

10.1 General

10.1.1 Test records

All test activities shall be noted in a log book.

10.1.2 Instrumentation calibration

All instrumentation used to collect data for evaluation of test results shall be calibrated. In the case of applied sensors and gauges that cannot be independently calibrated, specifications shall be traceable and the remaining chain shall be calibrated. Procedures for controlling, calibrating, maintaining and inspecting measuring and test equipment shall be developed and implemented in accordance with ISO/IEC 17025 or equivalent. When possible, an end-to-end calibration of the system should be made, verifying performance of all system components. In the procedures, it shall be addressed that recalibration has to be done for sensors that might be damaged as a consequence of a catastrophic blade or equipment failure during testing.²

10.1.3 Measurement uncertainties

All device uncertainties shall be listed in the test report.

In addition, the following uncertainties shall be estimated and reported:

- uncertainties in magnitude, direction and location of any applied load;
- uncertainties in magnitude, direction and location of displacement;
- uncertainties in magnitude, direction and location of the measured strain.³

10.1.4 Root fixture and test stand requirements

In case the root area and fixture is considered for testing, deviations between the test stand and the wind turbine blade assembly shall be evaluated.

The measured deflection of the blade should be corrected for deformation of the blade root fixture and the test stand. For the measured natural frequencies, damping and mode shapes, the effect of the test stand shall be considered. For relatively rigid test stands (contribution to tip deflection less than 1 %), the effect of the test stand can be ignored.

10.1.5 Environmental conditions monitoring

Environmental records may be necessary to quantify effects on the test blade such as stiffness variations, strain gauge drift (particularly on single element bridges) or drift in other sensors.

² Failure of the blade or equipment can result in overloading a sensor such as a load cell. Due to the possible strong dynamic effects, this overloading may be present during such a short period that it might not be (fully) detected by the measurement system.

³ The tolerance of a strain gauge is typically smaller than 1 %. However, strain gauges are often made of materials that are much stiffer than the coatings and adhesives used in wind turbine blade design. This implies that strain gauge design may have an impact on readings where strain gauges are applied on the surface of thick coatings and adhesives. Such readings on the surface of thick coatings and adhesives may not be representative for the strain in laminates below the coating or adhesive. Application of large strain gauges or removal of coating by grinding may reduce the difference between the strain gauge reading and the true strain in the laminates.

As a minimum, the temperature shall be recorded outside and inside the blade and on the blade surface to evaluate the difference between ambient temperature and blade temperature. These records shall be kept at time intervals sufficient to monitor fluctuations during all tests.

For materials influenced by moisture, the ambient humidity shall be recorded at intervals sufficient to monitor fluctuations during the test.

10.1.6 Deterministic corrections

10.1.6.1 Tare loads

The test may be influenced by gravitational loads that are not part of the test load or measured by the instrumentation. These loads shall be properly accounted for during the test and processing of the test data.

Tare loads can result from the masses of

- the blade itself;
- load introduction fixtures (actuators, whiffle tree apparatus, clamping structures, etc.);
- cables, slings, and transducers.

Tare loads and their location with respect to the blade co-ordinate system shall be documented.

10.1.6.2 Load angle changes

As the blade deflects, the load direction relative to the blade orientation can change. These load direction changes shall be taken into account. This is explained further in Annex C.

10.1.6.3 Induced torsion loading

Loads not acting through the elastic axis either due to deflection, pre-bending or test set-up will cause torsion moments in the blade. These moments can be significant and should be considered when specifying the test load. The applied loads may be intentionally offset from the elastic axis to give a prescribed torsion moment.

10.2 Static test

10.2.1 General

Testing using static loads is undertaken to obtain two separate types of information. One set of information relates to the blade's ability to resist the loads that the blade has been designed for. The second set of information relates to blade properties, strains and deflections arising from the applied loads. For convenience, the two sets of information are usually obtained during the same static test, although this is not a normative requirement.

10.2.2 Static load test

During the static load tests the following shall be measured (or derived from measurement) and recorded:

- magnitude and direction of the applied load(s) at the five load levels where strains are measured (see 10.2.3);
- a time signal – to assure minimal time at a load level (see 9.3). This can be in the form of an actual time signal or can be derived from the sample rate.

10.2.3 Strain measurement

The strains in the rotor blade shall be measured in areas of interest. Strain gauges are the preferred device used for these measurements. Depending on the areas of interest, strains in one or more directions shall be measured. As a minimum the strains at the following areas of interest shall be measured:

- the main load carrying structure (spar cap, beam flange) in the upper and lower shell, at four cross sections distributed over the area to be tested. The direction of strain measurement is typically longitudinal to the blade spanwise axis, but can be in other directions as required by model verification;
- the trailing and leading edges at the position of the maximum chord length and at half the blade length. The direction of strain measurement is typically parallel to the edges of the blade, but can be in other directions as required by model verification;
- the webs at the blade root area and on a web section with high calculated strain. Shear strain is the important strain measurement required and typically strain gauge rosettes are used;
- the two highest loaded connecting bolts, if the bolts are an integral part of the area to be tested. Both bolt tension and bending shall be measured.

Other areas of interest for strain measurements are typically at blade locations in which geometry transitions and critical design details are present, or the strain level is expected to be high.

The location and the orientation of the individual strain measurements shall be accurately documented. Strain measurements shall be taken for at least five load levels, distributed over the load range used in the test.

10.2.4 Deflection measurement

Deflection shall be measured at a number of points adequate to determine the deflection throughout the blade, but at not less than three locations. Flapwise deflections shall be measured in enough locations and at high enough loads to validate design tip deflection calculations.

10.3 Fatigue test

During the fatigue tests the following shall be measured and recorded:

- cycle count;
- signals that are used to control the blade test (for example: applied loads, deflections, acceleration, strains).

The functionality of the sensors shall be verified throughout the test. If a sensor or instrument fails during the fatigue test, its criticality for the test shall be assessed. Those that are critical to the fatigue test shall be fixed or replaced. To prove that the assumptions for the fatigue test are still valid, the stiffness of the blade should be checked and documented several times (e.g. 5) throughout the test.

10.4 Other blade property tests

10.4.1 Blade mass and center of gravity

The blade mass and the spanwise location of the center of gravity shall be determined. Subcomponents included (e.g. root bolts) shall be stated.

10.4.2 Natural frequencies

As a minimum, the first and second flatwise and first edgewise frequencies shall be measured. The mass of the test instrumentation can influence the results of the natural frequency tests.

10.4.3 Optional blade property tests

Testing of other blade properties may be of interest. These may include (but are not limited to):

- damping;
- mode shapes;
- creep;
- mass distribution;
- stiffness distribution.

11 Test results evaluation

11.1 General

Before starting the test program, after each test and at frequent intervals during the fatigue test, the blade shall be visually inspected on both the inside and outside.

Infrared or ultrasonic inspection and recording of sound emission may be used to supplement the visual inspection.

Inspection results shall be documented in the logbook. Observations shall be accompanied by appropriate documentation.

Critical electrical mounted or imbedded systems such as lightning down conductors or control related sensors shall be inspected and checked for proper function periodically throughout the test program.

In Clause 11, irreversible property changes of the blade are considered as damage. The following types of damage are defined:

- damage in form of catastrophic failure of test blade;
- damage in form of permanent deformation, loss of stiffness or change in other blade properties;
- superficial damage.

Observed damage shall be considered by the designer in a failure evaluation (see 11.5).

For detailed investigations after the test, the blade may be sectioned.

11.2 Catastrophic failure

Catastrophic failure is disintegration or collapse of a component or the complete test blade. Catastrophic failure results in loss of vital function which impairs safety. The following observations can be considered as catastrophic failure:

- breaking or collapse of the primary blade structure;
- complete failure of structural elements such as internal or external bond lines, skins, shear webs, root fasteners etc.;
- major parts become separated from the main structure.

Catastrophic failure is normally readily observed.

Observations shall be documented by description in writing and recording in form of photography or video.

11.3 Permanent deformation, loss of stiffness or change in other blade properties

The mass, center of gravity and natural frequencies measured before the static test (see 7.2, 10.4.1 and 10.4.2) shall be evaluated against the design assumptions. Other measured blade properties as described in 10.2.3 and 10.2.4 (strain distribution and deflection) shall be evaluated both after the static test and after the post fatigue static test.

The measurement of loads, deflections, strains and/or natural frequencies according to 10.2.2, 10.2.3, 10.2.4 and 10.4.2 shall be evaluated to detect possible loss of stiffness and/or permanent deformation.

11.4 Superficial damage

Marking of time and extent of damage on the blade surface shall be used for reference when observing progress of damage throughout the test program.

The following examples of observations can be considered as superficial damages:

- small cracks in laminate or bond lines;
- gelcoat cracking;
- paint flaking;
- surface bubbles;
- minor panel buckling without permanent deformation or damage;
- small delaminations.

In case repair of any of the superficial damages is described in the Operation and maintenance manual for the blade type, these damages are allowed to be repaired during the testing. For example, that could be the case for small cracks in laminate or bond lines, gelcoat cracks or paint flaking. If repairs are carried out, they have to be documented according to Clause 6.

11.5 Failure evaluation

Damage in the form of permanent deformation or loss of stiffness can be catastrophic or lead to functional failure for a blade in service.

Superficial damage can develop into functional or catastrophic failure over time in environmental conditions experienced by blades in service.

The designer shall evaluate the damages observed during the initial static tests and the fatigue tests and determine the effect on safety against catastrophic or functional failure. The basis for this evaluation is not covered by the present standard.

12 Reporting

12.1 General

The tests shall be documented in a report containing enough information to make the tests and their results comprehensible.

12.2 Test report content

The test report(s) shall include the following items, depending on the type of test:

- table of contents;
- contractor for the test;
- dates and locations for the tests;
- blade identification;
- blade description;
- test set-up and procedures;
- description of test load;
- test equipment used (including make, model, serial numbers, etc.);
- reference to calibration records of measurement equipment;
- locations of sensors and measurement points;
- blade specific calibration details (tare loads, strains, etc.);
- estimated uncertainties;
- description of inspections, repairs and observations;
- summary of tests and test results;
- deviations from test plans, laboratory procedures or normative references;
- list of references (test plans, laboratory procedures, normative references).

12.3 Evaluation of test in relation to design requirements

The evaluation of the test in relation to the design requirements shall at least include:

- evaluation of test loads including test load distribution;
- evaluation test results with respect to basis for design;
- evaluation of blade stiffness.

Annex A (informative)

Guidelines for the necessity of renewed static and fatigue testing

Due to adjustments in the production, improvements in designs and optimizations in general, the production rotor blades will often deviate from the blade that was originally used for full-scale testing.

Since it is impractical to repeat the full-scale test every time adjustments and improvements are made, it is necessary to make a distinction between changes requiring or not requiring a renewed full-scale test. While such requirements are outside the scope of this standard, and are left to the judgment of the manufacturer and/or certification body, some considerations are given below.

Observations made from the previous full-scale test should be considered, since these may indicate the correctness of the design assumptions and be valuable in assessing the need for retesting. Given the level of change, needs for renewed full-scale testing may only comprise a limited full-scale test, e.g. static test only, fatigue test only, test in one direction only, etc.

In general, adjustments and improvements that obviously strengthen the blade tend to reduce the need for renewed full-scale testing. Furthermore, changes only affecting areas with large safety margins should be less prone to trigger the need for renewed full-scale testing. However, changes that influence the loading of the wind turbine and thereby influence the design assumptions for the blade should be considered.

Some examples of adjustments and improvements in production and design typically requiring, or not requiring, renewed full-scale testing are given in Table A.1.

**Table A.1 – Examples of situations typically
requiring or not requiring renewed testing**

Adjustments and improvements typically requiring renewed full-scale testing	Adjustments and improvements typically not requiring renewed full-scale testing
Modified profile shape around significant tested areas (for example, largest chord)	Modified blade tip shape
Shortening of some layers of fibers	Prolongation on some layers of fibers
Shift to a new type of resin or new type of fibers (e.g. shift from polyester to epoxy or from glass fibers to carbon fibers)	Minor adjustments in raw materials as a part of the continuous development by the material supplier or shift to a new supplier of identical materials. In the latter case testing on coupon level may be needed.
Shift to a new type of core material with different Young or shear modulus in sandwich constructions. (Often combined with a change in core material thickness).	Modification of the chamfer angle in some core materials in sandwich construction.
Major changes in stacking sequences in sandwich constructions	Minor changes in stacking sequences in massive laminates
Shift to a new production method (e.g. hand lay-up to injection)	Minor changes in the production process (e.g. adjustments on curing cycle)

Besides adjustments and changes to the blade structure, it may be the case that the design loads for a certain blade change after the full-scale test of the blade has been completed. In this case, renewed full-scale testing will only be needed if the design loads increase. When the design loads change, a new evaluation of the test loads against the design loads shall be conducted.

Annex B (informative)

Areas to be tested

The following potential critical areas should be considered:

- the inboard part of the blade out to the span from where the section properties change only gradually;
- those parts of the blade where calculations show the smallest reserve factors against buckling, strength or fatigue life;
- if there is an aerodynamic braking device (or another blade system), that part of the blade incorporating this device, particularly where the structure is affected by this device.

No matter the testing methods used, achieving a proper load distribution in the outermost part of the blade is difficult. In most cases, this is not a major problem since the safety margin in a blade typically increases when approaching the tip.

In the light of the difficulties in applying a proper load distribution and the fact that testing of the outermost part of the blade may be less relevant due to large safety margins, it may be considered to cut the tip of the blade before testing.

Basically, cutting the tip should leave a sufficiently large part of the blade to enable testing of the sections where the lowest safety margins are present. If this is not the case, it may be considered to elevate the test loads in another blade section, principally alike the one with the lowest safety margin, in accordance with the method outlined in the following:

The test loads should be elevated by the factor f given by:

$$f = \frac{S_{\text{ref}}}{S_{\text{min}}}$$

where

f is the load elevation factor;

S_{ref} is the safety margin in the section used for verifying the strength of the section with the lowest safety factor;

S_{min} is the safety margin in the section with the lowest safety margin.

The formula used for calculating the factor f shall be used for each of the failure modes considered and the maximum value of f shall be applied when determining the test loads.

In case the bolts used for connecting the blade to the hub or blade bearing forms an integrated part of the blade root (e.g. in case of T-bolt connections), full-scale testing of the blade should include the proper blade bolts with the intended pretension.

Annex C (informative)

Effects of large deflections and load direction

Large deflections of a blade during testing typically lead to changes in load direction with magnitude.

The finite distance between attachment points for an actuator system in the laboratory and on the blade saddle implies that load direction angles will change when loading the blade. A longer distance normally reduces this change. The change in angle will result in a change to the load direction relative to the blade axis and the moment arm for calculation of the applied root moment and thereby also the moment at any point between the root and the load application point. This effect is sketched in Figure C.1.

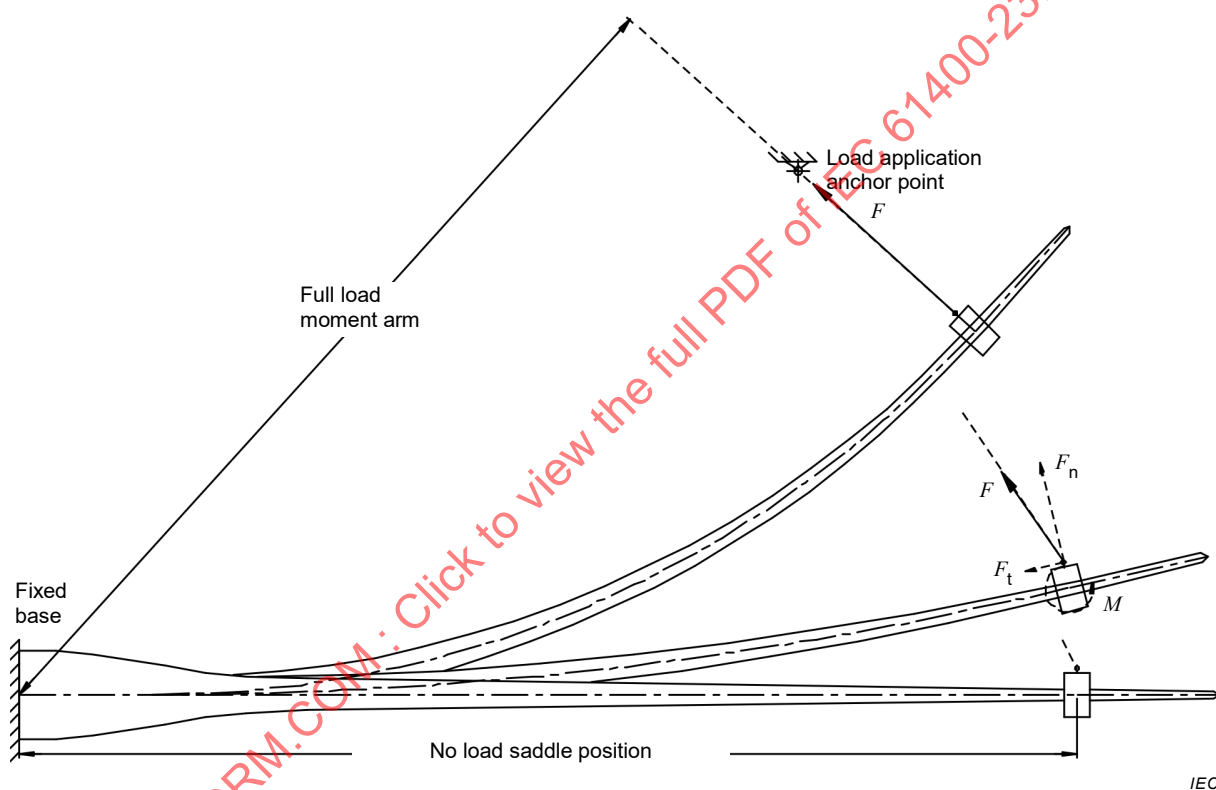


Figure C.1 – Applied loads effects due to blade deformation and angulation

In the case where the load application hinge line is not crossing the elastic axis of the blade, an additional moment is applied by the point load (see Figure C.1). This moment can also cause high local bearing pressure on the blade surface from the load introduction fixture.

In the case of a single axial load with the deformation perpendicular to the load, such as when the load is applied in the lead-lag direction and the blade also deforms in flap direction, changes in the load direction may also occur. Saddles not loaded perpendicular to the blade axis at high load may slip due to tangential forces (see F_t in Figure C.1). Such loading of saddles may also result in local prying forces that unintentionally overload the blade structure.

Multiple load introduction points could be used to minimize adverse loading conditions, especially at the higher load levels. Care shall also be taken to space saddles away from critical areas to be tested so that they are neither supported nor adversely influenced by the load introduction fixtures.

Annex D (informative)

Formulation of test load

D.1 Static target load

To generate the load envelope representing the worst case, all simulated time points shall be post processed. The directions and magnitudes of the design loads shall be chosen such that they cover this full load envelope. The design loads then shall be augmented by factors that represent the uncertainties from the test load formulation, the simplification of the load application, the blade to blade variation, and the environmental effects during testing.

In the following example the load is limited to only flap and lead-lag loads. To check the blade resistance against the combined loading (lead-lag wise, flap wise), at any considered station the resultant load vector should be calculated. In many cases the resultant load vector in between the pure lead-lag and flap direction shows a higher value compared to the pure flap or pure lead-lag load direction. As an example in Figure D.1 a polar plot is given of the resulting bending moment for a typical blade. The envelope was generated using load data from 10 different conditions. The lines represent individual spanwise locations. The resultant load vector was considered 360° around the blade axis in 15° steps. It shows that testing in flap and lead-lag direction only will not cover all design loads.

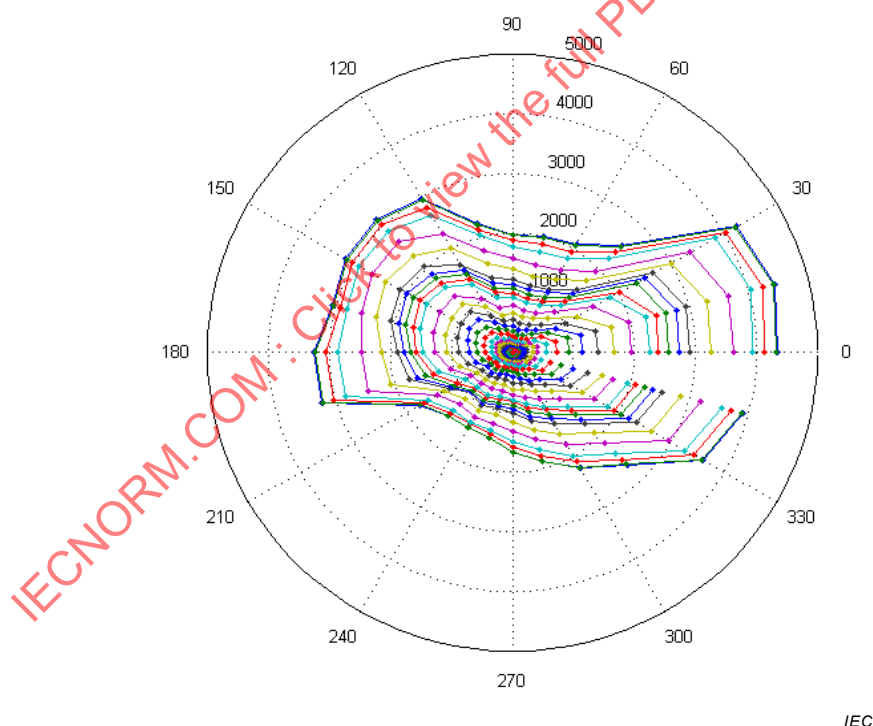


Figure D.1 – Polar plot of the load envelope from a typical blade

D.2 Fatigue target load

For each part of the blade that has to be tested, it has to be shown that the damage due to the test load is equal or higher than the damage due to the target load.

In order to determine the damage due to a load system, the load has to be translated into strain or stress. From these strain or stress cycles the damage can be calculated using an appropriate method of cycle counting and an appropriate fatigue formulation.

In order to avoid stacking of inaccuracies, the damage due to the test load and the damage due to the target load shall be evaluated using identical methods.

In practice, all parts of a blade cannot be properly tested. A criterion to determine the need to test a certain section of a blade can be the reserve against fatigue failure in that area. This determination should be made in accordance with the certifying body.

This reserve is generally expressed in the fatigue strain factor (*FSF*). This is the factor by which the load has to be multiplied to obtain damage equal to unity. Since the determination of the damage is a non-linear process, *FSF* has to be determined iteratively. For areas where this factor is high, a large reserve against fatigue damage exists and hence the need for testing this area is less urgent. If this factor is close to unity, the area is critical with respect to fatigue and testing is required.

In order for a given area to be properly tested, the damage due to the test load shall be equal or higher than the damage due to the target load. This means that the *FSF* for the fatigue test load shall be equal to or lower than the *FSF* for the fatigue target load.

The ratio between the *FSF* for the target load and the *FSF* for the test load can be defined as the relative *FSF* (*rFSF*):

$$rFSF = \frac{FSF_{\text{target}}}{FSF_{\text{test}}}$$

where

rFSF is the relative fatigue strain factor;

*FSF*_{target} is the fatigue strain factor for the target load;

*FSF*_{test} is the fatigue strain factor for the test load.

At all locations where the *rFSF* is bigger than unity the blade is properly tested.

As an example, the test load evaluation for a generic 62,5 m blade is given for two test methods. The examples given are only dealing with the stresses in the blade longitudinal direction and no attention is given to possible critical details and stresses in other directions. In the first part, the test load evaluation is given for a sequential single axial test, where the blade is sequentially loaded in pure flat and pure lead-lag direction. On the 62,5 m blade, strains are computed every 2 m of rotor diameter and on 26 locations distributed over the circumference of the chord for each spanwise location. From the resulting time series of strains in all these locations, together with the occurrences table and the fatigue life formulation, the damage and *FSF*'s are determined. The damage in each material is computed and at overlapping materials with different fatigue formulation the minimum *FSF* is considered. All computations are performed on the complete load set specified by IEC guidelines using an integrated wind turbine design tool.

The damage in the blade after 20 years of service has been determined. The *FSF*'s are presented as contour plots in Figure D.2. Although arbitrary, it has been chosen in this example to consider areas with an *FSF* lower than 1,4 as critical.

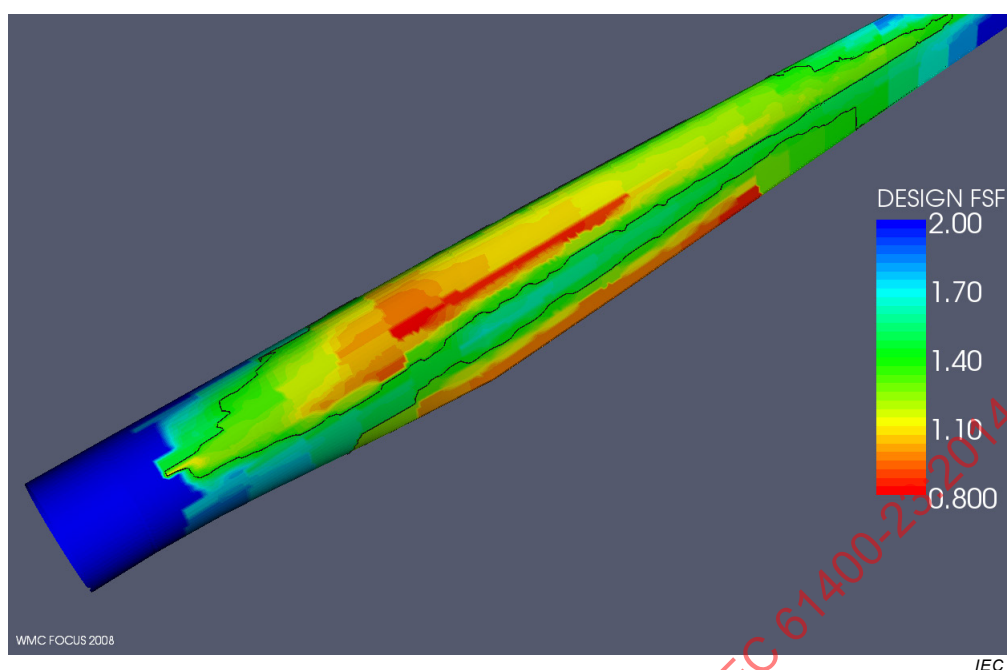


Figure D.2 – Design FSF

The black line in Figure D.2 connects the points where the FSF equals 1,4. The areas of the blade where this FSF is smaller than 1,4, should be tested. For clarity this area is represented as marked in red in Figure D.3.

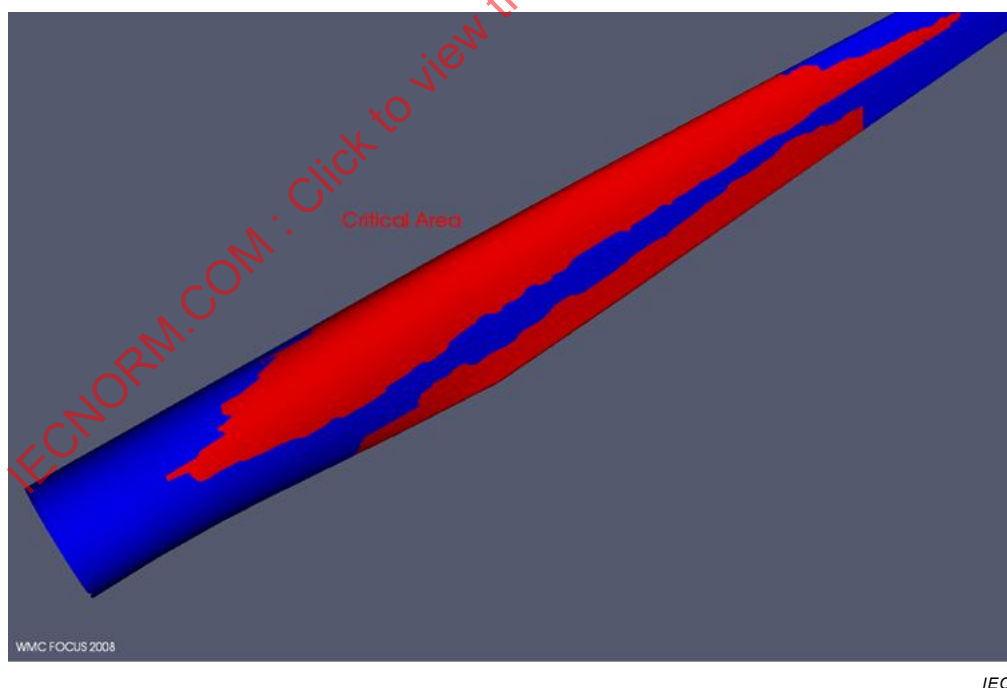


Figure D.3 – Area where design FSF is smaller than 1,4 (critical area)

Areas where computation might underestimate stresses should also be considered, for example areas of high stress concentration in the bolted root connection, bonded joints of LE and TE and the area between the root and largest chord.

D.3 Sequential single-axial, single location

At a single location two separate loads are applied successively in the main directions, the applied loads are periodic. The load is applied at $R = 40,0$ m. The load due to acceleration of the blade mass is neglected. The number of test cycles for each test load was fixed to 1 million cycles. Figure D.4 shows the ratio of test and design FSF. In the graph the critical areas from Figure D.3 are also indicated with a black contour line. It also shows which amount of the critical area is tested, while locally in the critical area the blade is more than 30 % overloaded. This example concerns only a single load introduction point – not taking into account inertia effects. This can be improved by a more realistic load distribution.

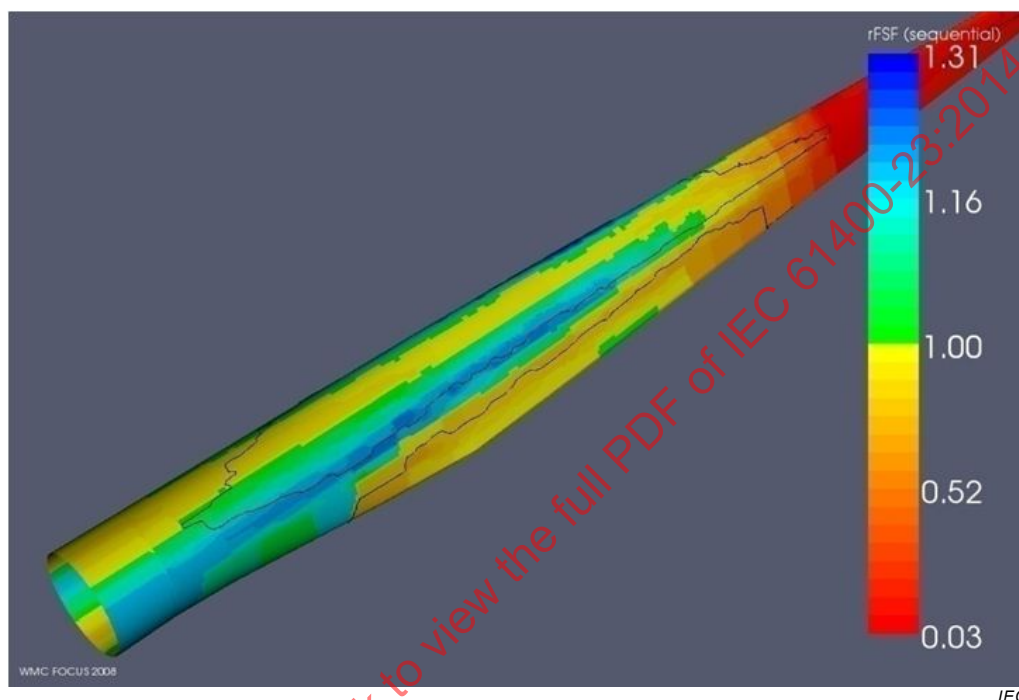


Figure D.4 – $rFSF$ and critical areas, sequential single-axial test

D.4 Multi axial single location

The second example is from a bi-axial test where on a single location a flat load as well as a lead-lag load is applied with a phase offset of about 90° so that the load introduction point describes an ellipsoidal trajectory in space. The $rFSF$ contours are given together with the aforementioned critical area in Figure D.5.

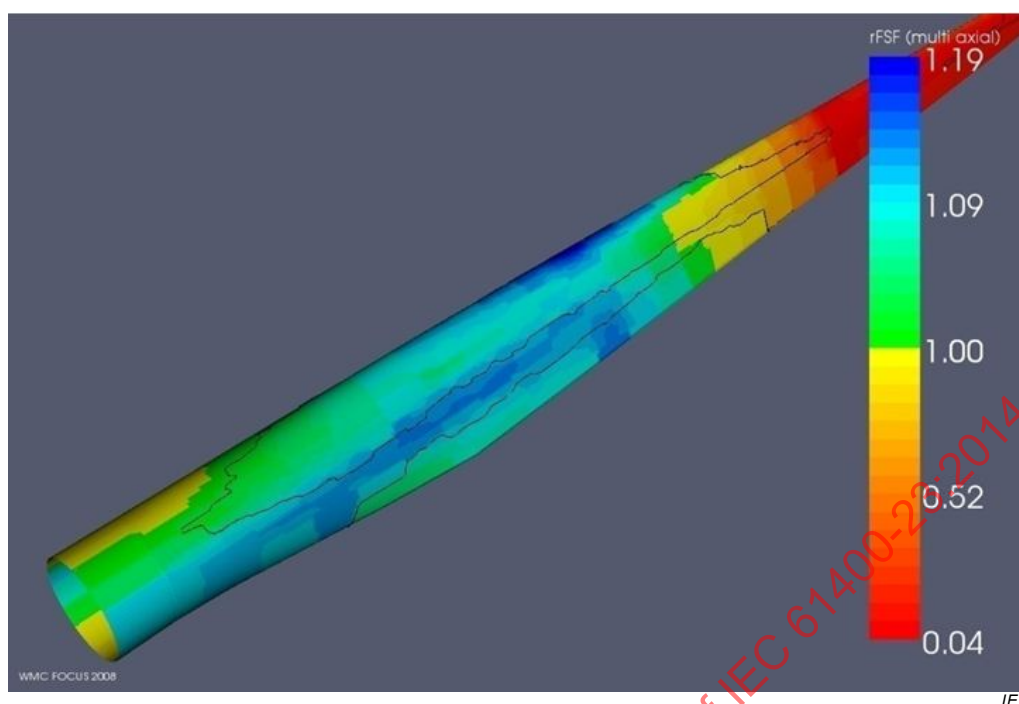


Figure D.5 – $rFSF$ and critical area, multi axial test

It can be seen that for this type of test, a much bigger part of the critical area is tested, while the overload in this area is limited to 19 %. In this example, and with the arbitrarily chosen FSF value of 1,4 to define the critical area, it appears that for both types of test, parts of the critical area are not satisfactorily tested. However, as with the static test, it can be seen that with the fatigue test, combined loading (multi-axial) results in a considerably bigger part of the blade to be properly tested.

Annex E (informative)

Differences between design and test load conditions

E.1 General

Ideally the testing performed on a wind turbine blade would recreate the design conditions of the blade. However, in practice there are a range of limitations on the tests that can be performed. As a result of these limitations some modifications and compromises are required in the static and fatigue testing undertaken on the blade. The following highlights some of the differences between design and test load conditions.

E.2 Load introduction

During a test, the load introduction is usually concentrated at spanwise blade sections. Due to the load concentration and possible reinforcement of the cross-section, expected deformations of the cross-section might be prevented, which would alter the blade stresses and/or strength locally. These load introduction points should therefore be located away from the areas specified to be tested (see 9.2 and Annex B).

E.3 Bending moments and shear

In a blade static test, loads are usually applied at a finite number of sections – whereas the ideal test load is distributed. This results in different spanwise distributions of section moments (see Figure E.1) and shear forces. The distribution of section moments can be improved by increasing the number of locations where load is applied; but this has the disadvantage of increasing the area of the blade that is disturbed. The objective is to replicate the target load as accurately as possible without compromising the validity of the test.

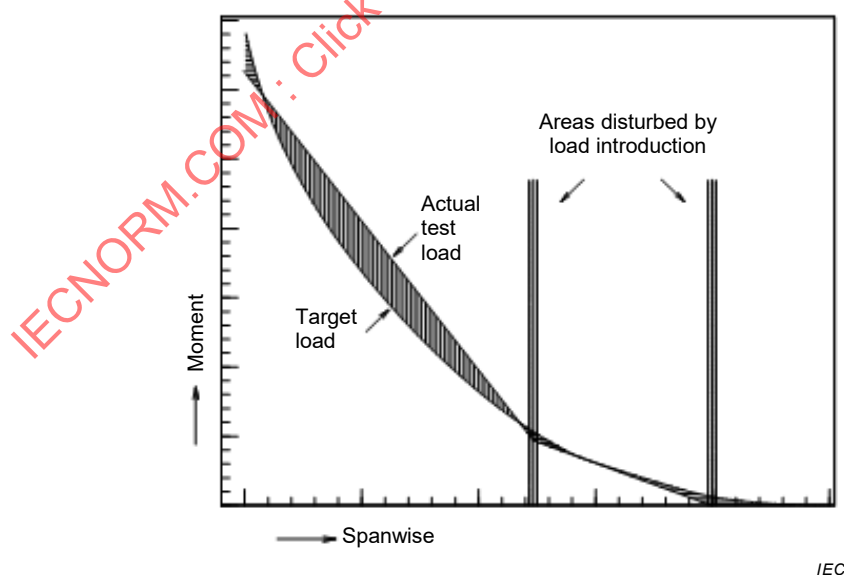


Figure E.1 – Difference of moment distribution for target and actual test load

E.4 Flapwise and lead-lag combinations

In static and fatigue tests, the results are most representative when combinations of flapwise and lead-lag loads are applied. By applying only the flapwise bending moment or only the

lead lag moment, the resulting stresses and strains and/or damage rates may be lower in some areas than the target values (see Annex D).

E.5 Radial loads

Radial loads on an operating wind turbine blade arise due to the gravitational and centrifugal forces. Generally, the stresses caused by the radial forces are low.

E.6 Torsion loads

The magnitude of the torsion design loads shall be considered in the test loading. If torsion loads are significant in the structural design of the blade they should be included in the test (see 10.1.6.3).

In principle a representative multi-axial loading will result in a more realistic situation with respect to torsion loading than single axial-loading. For a straight blade, the flapwise-loading and resulting flapwise displacement means that any simultaneously acting lead-lag loading will introduce a torsion loading which increases toward the root. This is true for the real operational situation as well as for the representative multi-axial test loading.

E.7 Environmental conditions

The environmental and time conditions during testing are different from those in the design situation. These conditions might include:

- humidity;
- temperature effects;
- UV radiation;
- aging (interaction of fatigue and time);
- salinity;
- chemical contamination.

Relevant effects have to be considered in the evaluation by using the appropriate strength and fatigue formulation both for design and test conditions. However, the validity of the different design formulations for the different conditions is not tested.

E.8 Fatigue load spectrum and sequence

Fatigue testing is generally accelerated compared to in-service fatigue by applying a test load, which subjects the blade to sufficient fatigue damage within a reasonable test period (see 9.4 and Annex D).

Annex F (informative)

Determination of number of load cycles for fatigue tests

F.1 General

This annex has been prepared in order to discuss the number of load cycles used by full-scale fatigue testing of rotor blades.

It is assumed that a test load factor covering errors in the fatigue formulation γ_{ef} of 1,05 is appropriate for fatigue tests aiming for a total of 1 million load cycles.

On the basis hereof, it is found that a γ_{ef} factor of 1,035 should be used for full scale fatigue tests loading the structure with e.g. 2,5 million load cycles. This result and others are summarized in Table F.1 below.

Table F.1 – Recommended values for γ_{ef} for different number of load cycles

Number of load cycles	γ_{ef}
5×10^5	1,065
1×10^6	1,050
$2,5 \times 10^6$	1,035
5×10^6	1,025
1×10^7	1,015

F.2 Background

The number of loads cycles applied to a rotor blade during full scale fatigue testing is, of course, a decisive factor for the duration of the fatigue test. Consequently, there will always be a wish to limit the number of load cycles as long as the test still fulfils its purpose with the intended trustworthiness.

On the basis of the coefficients historically used for calculating the test load factor, calculations are carried out in order to evaluate the influence of the number of load cycles in a full scale fatigue test on the test load factor.

F.3 The approach used

First of all consider the Goodman diagram in Figure F.1, which has been reduced to a single sided diagram for the sake of simplicity.

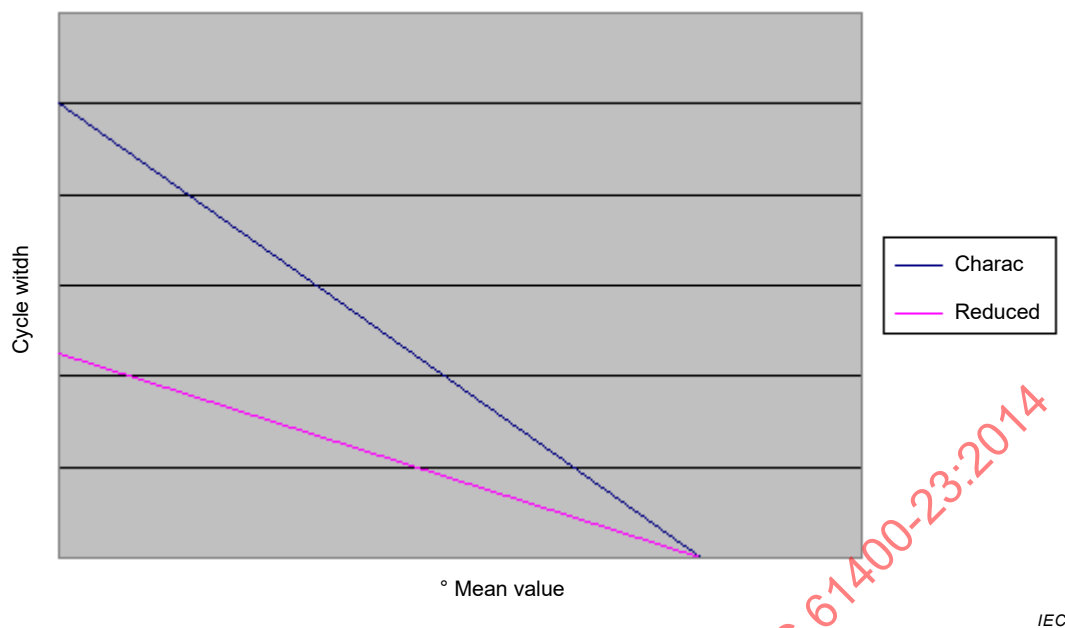


Figure F.1 – Simplified Goodman diagram

The line denoted “Charac” is based upon the characteristic strength values with intersection of the horizontal axis in a value representing the static strength of the structure S and intersection with the vertical axis in the dynamic strength valid for one single load cycle D .

The line “Reduced” is valid for a certain number of cycles n . This line also intersects the horizontal axis in the point S but the vertical axis is intersected in the point D_r , which is given by Formula (F.1).

$$D_r = \frac{D}{n^{1/m}} \quad (\text{F.1})$$

where

D_r is the reduced dynamic strength valid for one load cycle;

D is the dynamic strength valid for one load cycle;

n is the actual number of load cycles;

m is the fatigue damage exponent for the material.

The damage for a certain load width W and load mean value M is given by the actual number of load cycles n divided by the allowed number of load cycles N , which is equal to the actual load width divided by the allowed load width to the power of m , Formula (F.2).

$$\text{Damage} = \frac{n}{N} = \left(\frac{W}{-\frac{D_r}{S} \cdot M + D_r} \right)^m \quad (\text{F.2})$$

where

N is the allowed number of load cycles;

W is the load width;

S is the static strength of the structure;

M is the load mean value.

After inserting Formula (F.1) in Formula (F.2) and re-arranging, Formula (F.3) is obtained.

$$\text{Damage} = \left(\frac{W \cdot S \cdot n^{(1/m)}}{D \cdot (S - M)} \right)^m \quad (\text{F.3})$$

The fatigue test is continued until the test damage, given by Formula (F.4) is equal to the target damage given by Formula (F.5) where subscript “t” refers to the test and subscript “0” refers to the calculated loads and thereby the target damage.

$$\text{Test Damage} = \left(\frac{W_t \cdot S \cdot n_t^{(1/m)}}{D \cdot (S - M_t)} \right)^m \quad (\text{F.4})$$

$$\text{Target Damage} = \gamma_{\text{test}}^m \cdot \left(\frac{W_0 \cdot S \cdot n_0^{(1/m)}}{D \cdot (S - M_0)} \right)^m \quad (\text{F.5})$$

where

t is a subscript referring to test values;

0 is a subscript referring to calculated values;

γ_{test} is the test load factor.

Setting the test damage equal to the target damage, Formula (F.6) is obtained after some re-arranging

$$W_t = \gamma_{\text{test}} \cdot W_0 \cdot \frac{(S - M_t)}{(S - M_0)} \cdot \left(\frac{n_0}{n_t} \right)^{(1/m)} \quad (\text{F.6})$$

In order to investigate the sensitivity of W_t in relation to the fatigue damage exponent m , the derivative of W_t with respect to m is calculated, Formula (F.7).

$$\frac{\partial W_t}{\partial m} = -\gamma_{\text{test}} \cdot W_0 \cdot \frac{(S - M_t)}{(S - M_0)} \cdot \frac{\left(\frac{n_0}{n_t} \right)^{(1/m)}}{m^2} \cdot \ln \left(\frac{n_0}{n_t} \right) \quad (\text{F.7})$$

The effect of changing from one number of load cycles n_{t1} in the fatigue test to another number of load cycles n_{t2} can be illustrated by R defined by Formula (F.8).

$$R = \frac{\frac{\partial W_t}{\partial m}(n_t = n_{t1})}{\frac{\partial W_t}{\partial m}(n_t = n_{t2})} = \frac{\left(\frac{n_0}{n_{t1}} \right)^{(1/m)} \cdot \ln \left(\frac{n_0}{n_{t1}} \right)}{\left(\frac{n_0}{n_{t2}} \right)^{(1/m)} \cdot \ln \left(\frac{n_0}{n_{t2}} \right)} = \left(\frac{n_{t2}}{n_{t1}} \right)^{(1/m)} \cdot \frac{\ln \left(\frac{n_0}{n_{t1}} \right)}{\ln \left(\frac{n_0}{n_{t2}} \right)} \quad (\text{F.8})$$

where

R is the relative effect of changing from one number of load cycles (n_{t1}) to another (n_{t2});

n_{t1} is the first (reference) number of load cycles;

n_{t2} is the second (resulting) number of load cycles.

Suppose the total number of load cycles in the Markov matrix n_0 is 50 million and the fatigue damage exponent m is 9. If n_{t1} is 2,5 million and n_{t2} is 1 million, Formula (F.8) yields $R = 0,7$. It should be noted that the sensitivity of R to changes in n_0 and m is minor.

The test load factor to be used for fatigue testing is the product of 3 factors, where the γ_{ef} equal to 1,05 takes account of possible errors in the fatigue formulation, i.e. fatigue damage exponents deviating from the assumed values among others.

If a value of γ_{ef} of 1,05 is appropriate for tests with 1 million cycles, this 5 % increase in loads should be reduced to 3,5 % in case the test is extended to 2,5 million cycles instead since $0,05 \times 0,7 = 0,035$. The results for different values of the number of load cycles in a fatigue test are stated in Table F.2.

**Table F.2 – Expanded recommended values for γ_{ef}
for different number of load cycles**

n_{t1}	R	γ_{ef}
5×10^5	1,3	1,064
1×10^6	1	1,050
$2,5 \times 10^6$	0,7	1,035
5×10^6	0,5	1,025
1×10^7	0,32	1,016
The values are calculated on the basis of Formula (F.8) using $n_0 = 50$ million, $n_{t2} = 1$ million and $m = 9$.		

The results given in Table F.2 are depicted graphically in Figure F.2.

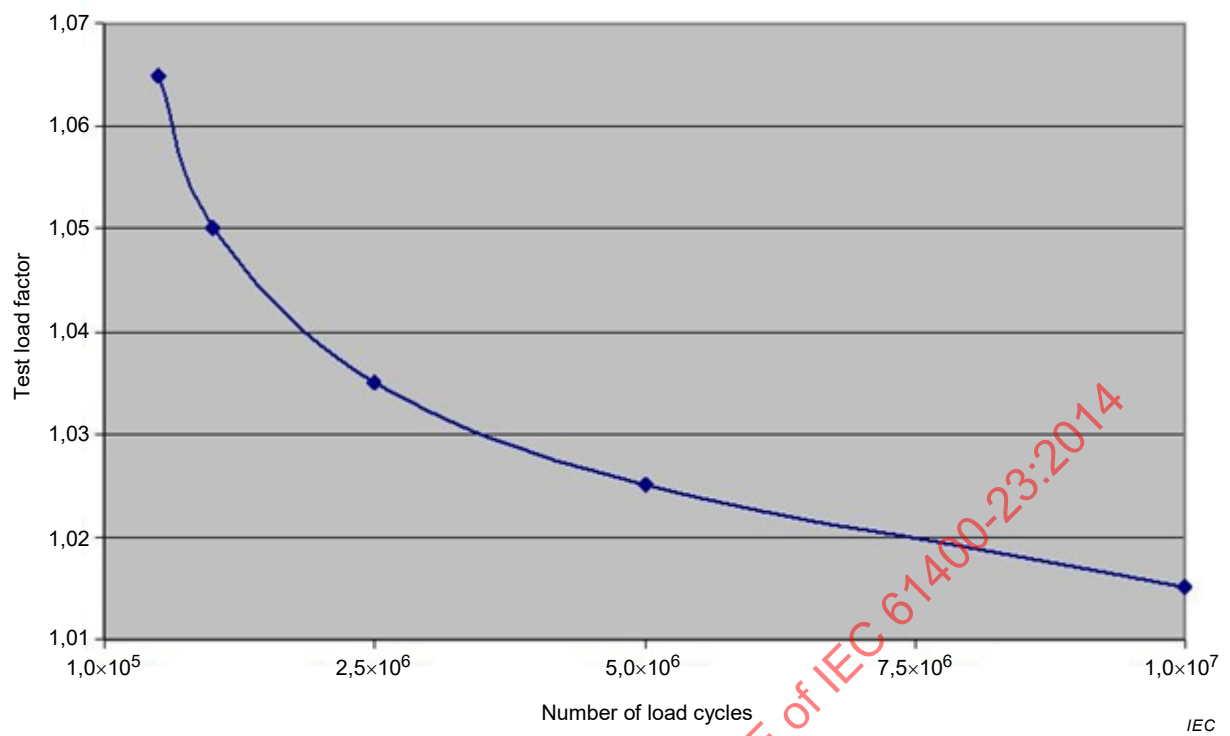


Figure F.2 – Test load factor γ_{ef} for different number of load cycles in the test

Bibliography

IEC 61400-22, *Wind turbines – Part 22: Conformity testing and certification*

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61400-23:2014

SOMMAIRE

AVANT-PROPOS	47
INTRODUCTION.....	49
1 Domaine d'application	50
2 Références normatives	50
3 Termes et définitions	51
4 Notation	54
4.1 Symboles	54
4.2 Symboles grecs	54
4.3 Indices	54
4.4 Systèmes de coordonnées	55
5 Principes généraux.....	56
5.1 Objet des essais.....	56
5.2 États limites	57
5.3 Contraintes pratiques	57
5.4 Résultats d'essai	58
6 Documentation et procédures applicables à la pale d'essai	58
7 Programme et plans d'essai de la pale	59
7.1 Surfaces à soumettre à l'essai.....	59
7.2 Programme d'essai.....	59
7.3 Plans d'essai	59
7.3.1 Généralités.....	59
7.3.2 Description de la pale	59
7.3.3 Charges et conditions	60
7.3.4 Instruments	60
7.3.5 Résultats d'essai prévus.....	60
8 Facteurs de charge pour les essais	60
8.1 Généralités.....	60
8.2 Facteurs partiels de sécurité utilisés dans la conception	61
8.2.1 Généralités.....	61
8.2.2 Facteurs partiels pour les matériaux	61
8.2.3 Facteurs partiels pour les conséquences de défaillance	61
8.2.4 Facteurs partiels pour les charges	61
8.3 Facteurs de charge d'essai.....	62
8.3.1 Variation entre pales	62
8.3.2 Erreurs possibles dans la formulation de la fatigue	62
8.3.3 Conditions ambiantes	62
8.4 Application des facteurs de charge pour obtenir la charge cible.....	63
9 Charge d'essai et évaluation de la charge d'essai.....	63
9.1 Généralités.....	63
9.2 Influence de l'introduction des charges	64
9.3 Essais de charge statique	64
9.4 Essais de charge de fatigue	65
10 Exigences d'essai.....	66
10.1 Généralités.....	66
10.1.1 Enregistrements d'essai	66
10.1.2 Étalonnage des instruments	66

10.1.3	Incertitudes de mesure	66
10.1.4	Exigences concernant la fixation des pieds et le banc d'essai.....	67
10.1.5	Surveillance des conditions ambiantes	67
10.1.6	Corrections déterministes	67
10.2	Essai statique.....	68
10.2.1	Généralités.....	68
10.2.2	Essai de charge statique	68
10.2.3	Mesure des déformations	68
10.2.4	Mesure de la déviation	69
10.3	Essai de fatigue	69
10.4	Autres essais de propriétés de la pale	69
10.4.1	Masse de la pale et centre de gravité	69
10.4.2	Fréquences propres.....	69
10.4.3	Essais facultatifs de propriétés de la pale.....	69
11	Évaluation des résultats d'essai.....	69
11.1	Généralités.....	69
11.2	Défaillance catastrophique	70
11.3	Déformation permanente, perte de rigidité ou changement des autres propriétés de la pale.....	70
11.4	Dommages superficiels.....	70
11.5	Évaluation des défaillances	71
12	Rapport	71
12.1	Généralités.....	71
12.2	Contenu de rapport d'essai.....	71
12.3	Évaluation de l'essai par rapport aux exigences de conception.....	72
Annexe A (informative)	Lignes directrices relatives à la nécessité de procéder à de nouveaux essais statiques et de fatigue	73
Annexe B (informative)	Surfaces à soumettre à l'essai.....	75
Annexe C (informative)	Effets des déviations importantes et de la direction de la charge	76
Annexe D (informative)	Formulation de la charge d'essai	78
D.1	Charge cible statique.....	78
D.2	Charge cible de fatigue	79
D.3	Emplacement unique monoaxial séquentiel	81
D.4	Emplacement unique multiaxial	82
Annexe E (informative)	Différences entre conditions de charge théorique et conditions de charge d'essai	84
E.1	Généralités.....	84
E.2	Introduction de la charge	84
E.3	Moments de flexion et cisaillement	84
E.4	Combinaisons de charges en battement et en traînée	85
E.5	Charges radiales	85
E.6	Efforts de torsion.....	85
E.7	Conditions ambiantes	86
E.8	Spectre et séquence de charges de fatigue	86
Annexe F (informative)	Détermination du nombre de cycles de charge pour les essais de fatigue	87
F.1	Généralités.....	87
F.2	Contexte	87

F.3 Approche utilisée.....	87
Bibliographie.....	92
Figure 1 – Système de coordonnées dans le sens de la corde (dans le sens de la corde et dans le sens de la traînée).....	55
Figure 2 – Système de coordonnées du rotor (dans le sens du battement et dans le sens de la traînée).....	56
Figure C.1 – Effets des charges appliquées dus à la déformation et à l'angulation des pales	76
Figure D.1 – Diagramme polaire de l'enveloppe de charges à partir d'une pale typique.....	78
Figure D.2 – Facteur r_{FSF} théorique	80
Figure D.3 – Surface où le facteur r_{FSF} théorique est inférieur à 1,4 (surface critique)	81
Figure D.4 – Rapport r_{FSF} et surfaces critiques, essai monoaxial séquentiel	82
Figure D.5 – Rapport r_{FSF} et surface critique, essai multiaxial	83
Figure E.1 – Différence de répartition des moments pour la charge cible et la charge d'essai réelle	85
Tableau F.1 - Valeurs recommandées pour γ_{ef} pour différents nombres de cycles de charge	87
Figure F.1 – Diagramme de Goodman simplifié.....	88
Figure F.2 – Facteur de charge d'essai γ_{ef} pour différents nombres de cycles de charge dans l'essai	91
Tableau 1 - Valeurs recommandées pour γ_{ef} pour différents nombres de cycles de charge	62
Tableau A.1 – Exemples de situations exigeant généralement ou non de procéder à de nouveaux essais	74
Tableau F.2 - Valeurs recommandées étendues pour γ_{ef} pour différents nombres de cycles de charge.....	90

COMMISSION ÉLECTROTECHNIQUE INTERNATIONALE

ÉOLIENNES –

Partie 23: Essais en vraie grandeur des structures des pales de rotor

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 61400-23 a été établie par le comité d'études 88 de l'IEC: Éoliennes.

Cette première édition annule et remplace l'IEC TS 61400-23 parue en 2001. Cette édition constitue une révision technique.

Cette édition inclut les modifications techniques majeures suivantes par rapport à l'IEC TS 61400-23:

- a) décrit uniquement des essais basés sur des charges;
- b) condensée afin de décrire les principes et demandes ou contraintes d'ordre général.

La présente version bilingue (2019-01) correspond à la version anglaise monolingue publiée en 2014-04.

Le texte anglais de cette norme est issu des documents 88/420/CDV et 88/448/RVC.

Le rapport de vote 88/448/RVC donne toute information sur le vote ayant abouti à l'approbation de cette norme.

La version française de cette norme n'a pas été soumise au vote.

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

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 – 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 61400-23:2014

INTRODUCTION

Les pales du rotor d'une éolienne sont généralement considérées comme l'un des composants les plus critiques du système d'éolienne. La présente norme définit les demandes ou contraintes relatives aux essais en vraie grandeur des structures liés à la certification, de même qu'elle fournit une interprétation et une évaluation des résultats d'essai.

Des méthodes d'essai ou des configurations d'essai spécifiques ne sont pas exigées ni incluses, dans la mesure où les méthodes d'essai en vraie grandeur des pales se sont développées jusqu'à ce jour de manière indépendante dans des pays et des laboratoires différents.

Par ailleurs, les demandes concernant les essais de détermination des propriétés des pales sont incluses dans la présente norme afin de valider certaines hypothèses de calcul essentielles utilisées comme éléments d'entrée des calculs de charges théoriques.

Toute exigence de la présente norme peut être modifiée s'il peut être démontré de manière adéquate que la sécurité du système n'est pas compromise.

La norme est basée sur l'IEC TS 61400-23 parue en avril 2001. En comparaison avec la spécification technique, la présente norme décrit uniquement des essais basés sur des charges et est condensée afin de décrire les principes et demandes ou contraintes d'ordre général.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61400-23:2014

ÉOLIENNES –

Partie 23: Essais en vraie grandeur des structures des pales de rotor

1 Domaine d'application

La présente partie de l'IEC 61400 définit les exigences concernant les essais en vraie grandeur des structures des pales d'éolienne, ainsi que l'interprétation et l'évaluation des résultats d'essai obtenus. La norme cible les aspects des essais liés à une évaluation de l'intégrité des pales, et s'adresse aux fabricants et aux chercheurs tiers.

La présente norme prend en considération les essais suivants:

- essais de charge statique;
- essais de fatigue;
- essais de charge statique après essais de fatigue;
- essais déterminant d'autres propriétés des pales.

L'objet des essais est de confirmer à un niveau de probabilité acceptable que tous les modèles d'un type de pale satisfont aux hypothèses de calcul.

Il est supposé que les données exigées pour définir les paramètres des essais existent et sont basées sur la norme relative aux exigences de conception concernant les éoliennes telle que l'IEC 61400-1 ou une norme équivalente. Les charges théoriques et les données concernant les matériaux des pales sont considérées comme des points de départ pour établir et évaluer les charges d'essai. L'évaluation des charges théoriques par rapport aux charges réelles appliquées aux éoliennes ne relève pas du domaine d'application de la présente norme.

Au moment de la rédaction de la présente norme, les essais en vraie grandeur étaient effectués sur les pales d'éoliennes à axe horizontal. Les pales étaient constituées principalement de plastique renforcé de fibre et de bois/résine époxyde. Cependant, la plupart des principes restent applicables à toutes les configurations et tailles d'éolienne, ainsi qu'à tous les matériaux constitutifs de ces éoliennes.

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).

IEC 60050-415:1999, *Vocabulaire électrotechnique international – Partie 415: Aérogénérateurs*

IEC 61400-1: 2005, *Éoliennes – Partie 1: Exigences de conception*

ISO/IEC 17025:2005, *Exigences générales concernant la compétence des laboratoires d'étalonnages et d'essais*

ISO 2394:1998, *Principes généraux de la fiabilité des constructions*

3 Termes et définitions

Pour les besoins du présent document, les termes et définitions relatifs aux éoliennes ou à l'énergie éolienne donnés dans l'IEC 60050-415, ainsi que les suivants, s'appliquent.

3.1

actionneur

dispositif qui peut être commandé pour appliquer une force et un déplacement constants ou variables

3.2

pied de pale

partie de la pale du rotor qui est connectée au moyeu du rotor

3.3

sous-système de pale

ensemble intégré d'éléments qui accomplissent un objectif ou une fonction défini(e) dans la pale (par exemple, sous-système de protection contre la foudre, sous-système de freinage aérodynamique, sous-système de surveillance, sous-système de contrôle aérodynamique, etc.)

3.4

flambement

instabilité caractérisée par une augmentation non linéaire de la déviation hors plan avec modification de la charge de compression locale

3.5

corde

longueur d'une droite de référence qui relie les bords d'attaque et de fuite d'une section de pale aérodynamique à un emplacement donné dans le sens de l'envergure

3.6

charge d'amplitude constante

au cours d'un essai de fatigue, application de cycles de charge avec une amplitude constante et une valeur moyenne

3.7

fluage

augmentation d'une déformation en fonction du temps sous l'action d'une charge soutenue

3.8

charges théoriques

charges auxquelles la pale est censée résister par conception, y compris les facteurs partiels de sécurité appropriés

3.9

dans le sens de la traînée

direction parallèle à la corde locale

VOIR: 4.4

3.10

axe élastique

ligne, sur toute la longueur de la pale, le long de laquelle les charges transversales sont appliquées de manière à ne générer qu'une flexion, sans torsion de la section

Note 1 à l'article: Au sens strict du terme, il n'existe aucune ligne de ce type à l'exception de quelques conditions de charge. Habituellement, l'axe élastique est supposé être la ligne passant par le centre élastique de chaque section. Cette définition ne s'applique pas aux pales avec couplage par flexion-torsion.

3.11

formulation de la fatigue

méthodologie qui permet d'estimer la durée de vie en fatigue

3.12

essai de fatigue

essai dans lequel une charge cyclique d'amplitude constante ou variable est appliquée à l'éprouvette

3.13

fixation

composant ou dispositif destiné à introduire des charges ou à soutenir l'éprouvette

3.14

en battement

direction perpendiculaire à la surface balayée par l'axe de la pale de rotor non déformée

VOIR: 4.4

3.15

dans le sens de la corde

direction perpendiculaire à la corde locale et à l'axe des pales en envergure

VOIR: 4.4

3.16

essai en vraie grandeur

essai effectué sur la pale réelle ou une partie de celle-ci

3.17

intérieur

en direction du pied de pale

3.18

traînée

direction parallèle au plan de la surface balayée et perpendiculaire à l'axe longitudinal de la pale de rotor non déformée

VOIR: 4.4

3.19

enveloppe de charges

ensemble des charges théoriques maximales dans toutes les directions et positions en envergure

3.20

fréquence propre

fréquence à laquelle une structure vibre en cas de perturbation et peut vibrer librement

3.21

facteurs partiels de sécurité

facteurs appliqués aux charges et aux résistances des matériaux afin de prendre en compte les incertitudes des valeurs (caractéristiques) représentatives

3.22

précourbure

courbure des pales dans le plan en battement en l'absence de charges

3.23**valeur R**

rapport entre les valeurs minimale et maximale au cours d'un cycle de charge

3.24**formulation S-N**

méthode qui permet de décrire les caractéristiques de contrainte et/ou déformation (S) par rapport aux caractéristiques de cycle (N) d'un matériau, d'un composant ou d'une structure

3.25**en envergure**

direction parallèle à l'axe longitudinal d'une pale de rotor

3.26**essai statique**

essai qui consiste à appliquer un seul cycle de charge sans introduire d'effets dynamiques

3.27**rigidité**

rapport de la variation de la force à la variation correspondante du déplacement d'un corps élastique

3.28**déformation**

rapport de l'allongement (ou déplacement par cisaillement) d'un matériau soumis à une contrainte à la longueur d'origine de ce même matériau

3.29**balayage**

courbure des pales dans le plan en traînée en l'absence de charges

3.30**charges de tare**

charges gravitationnelles ou autres charges intrinsèques à la configuration d'essai

3.31**charge cible**

charge constituée à partir de la charge théorique et qui représente la charge d'essai théorique

3.32**charge d'essai**

forces appliquées au cours d'un essai

3.33**surface soumise à l'essai**

région de l'objet en essai soumis à la charge prévue

3.34**torsion**

variation en envergure de l'angle des cordes des sections de pales

3.35**charge d'amplitude variable**

application de cycles de charge de gamme moyenne et/ou cyclique non constante

3.36

palonnier

dispositif de répartition d'une source de charge unique sur plusieurs points le long d'une éprouvette

4 Notation

4.1 Symboles

C	facteurs de conversion pour la résistance des matériaux
D	dommage théorique
F	charge
F_a	effort de cisaillement dans le sens de la corde (coordonnées dans le sens de la corde)
F_b	effort de cisaillement dans le sens de la traînée (coordonnées dans le sens de la corde)
F_c	effort (de traction) en envergure (coordonnées dans le sens de la corde)
F_x	effort de cisaillement en battement (système de coordonnées du rotor)
F_y	effort de cisaillement en traînée (système de coordonnées du rotor)
F_z	effort (de traction) en envergure (système de coordonnées du rotor)
M_a	moment de flexion dans le sens de la traînée (coordonnées dans le sens de la traînée)
M_b	moment de flexion dans le sens de la corde (coordonnées dans le sens de la corde)
M_c	moment de torsion des pales (coordonnées dans le sens de la corde)
M_x	moment de flexion en traînée (système de coordonnées du rotor)
M_y	moment de flexion en battement (système de coordonnées du rotor)
M_z	moment de torsion des pales (système de coordonnées du rotor)
N	cycle
S	déformation ou contrainte

4.2 Symboles grecs

γ	facteur partiel ou facteur de charge d'essai
σ	contrainte ou déformation appliquée

4.3 Indices

conception	conditions de charges théoriques
df	charge théorique: fatigue
du	charge théorique: statique
ef	incertitude de formulation de la fatigue de la charge d'essai
f	charge
lf	effets sur l'environnement: fatigue
lu	effets sur l'environnement: statique
m	matériau
n	conséquence d'une défaillance
nf	conséquence d'une défaillance: fatigue
nu	conséquence d'une défaillance: statique
sf	variation entre pales: charge d'essai de fatigue

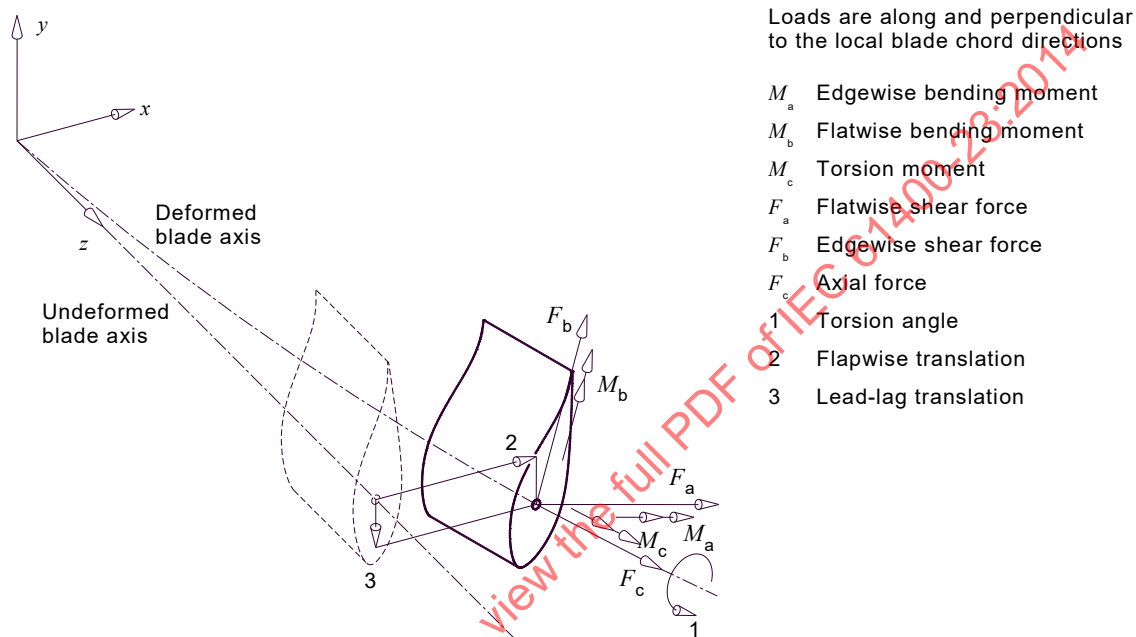
su variation entre pales: charge d'essai statique

cible conditions de charge cible

essai conditions de charge d'essai

4.4 Systèmes de coordonnées

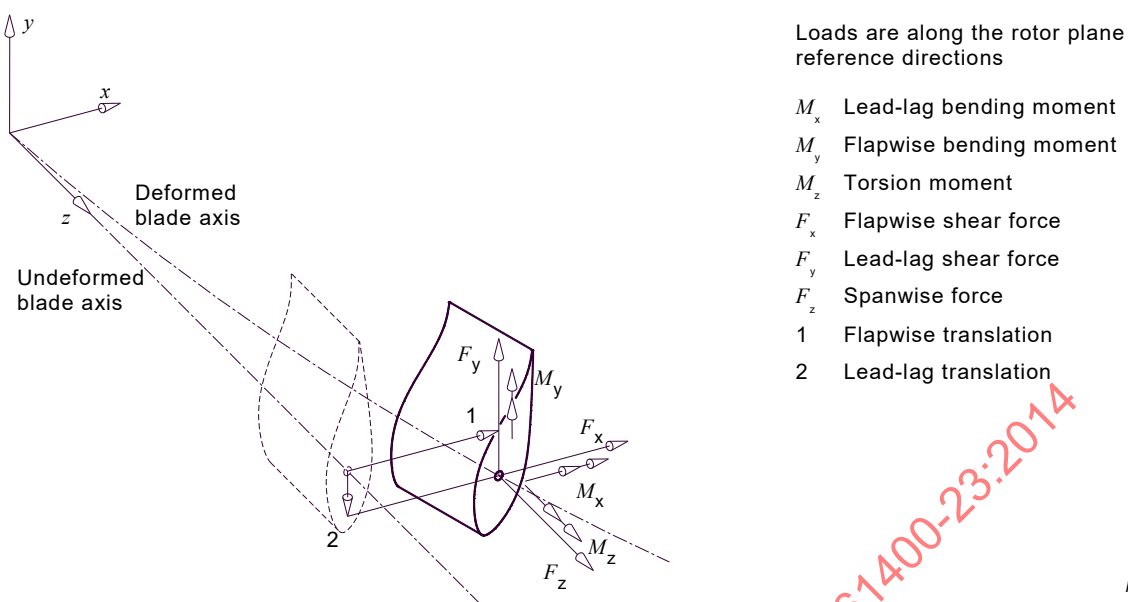
Deux systèmes de coordonnées différents peuvent être utilisés pour référence au cours des essais de structure. Le premier système, présenté à la Figure 1, s'applique aux directions de cordes de pales locales. Le second système, présenté à la Figure 2, s'applique aux directions générales du plan du rotor.



IEC

Anglais	Français
Deformed blade axis	Axe de pale déformée
Undeformed blade axis	Axe de pale non déformée
Loads are along and perpendicular to the local blade chord directions	Les charges sont appliquées le long et perpendiculairement aux directions de cordes de pales locales
M_a Edgewise bending moment	M_a Moment de flexion dans le sens de la traînée
M_b Flatwise bending moment	M_b Moment de flexion dans le sens de la corde
M_c Torsion moment	M_c Moment de torsion
F_a Flatwise shear force	F_a Effort de cisaillement dans le sens de la corde
F_b Edgewise shear force	F_b Effort de cisaillement dans le sens de la traînée
F_c Axial force	F_c Effort axial
1 Torsion angle	1 Angle de torsion
2 Flapwise translation	2 Translation en battement
3 Lead-lag translation	3 Translation en traînée

Figure 1 – Système de coordonnées dans le sens de la corde (dans le sens de la corde et dans le sens de la traînée)



IEC

Anglais	Français
Deformed blade axis	Axe de pale déformée
Undeformed blade axis	Axe de pale non déformée
Loads are along the rotor plane reference directions	Les charges sont appliquées le long des directions de référence du plan du rotor
M_x Lead-lag bending moment	M_x Moment de flexion en traînée
M_y Flapwise bending moment	M_y Moment de flexion en battement
M_z Torsion moment	M_z Moment de torsion
F_x Flapwise shear force	F_x Effort de cisaillement en battement
F_y Lead-lag shear force	F_y Effort de cisaillement en traînée
F_z Spanwise force	F_z Effort en envergure
1 Flapwise translation	1 Translation en battement
2 Lead-lag translation	2 Translation en traînée

Figure 2 – Système de coordonnées du rotor (dans le sens du battement et dans le sens de la traînée)

5 Principes généraux

5.1 Objet des essais

L'objet fondamental d'un essai de pales d'éolienne consiste à démontrer, à un niveau de certitude raisonnable, qu'un type de pale, lorsqu'il est fabriqué selon un certain ensemble de spécifications, présente la fiabilité indiquée par référence à des états limites spécifiques, ou, plus précisément, à vérifier que les états limites spécifiés ne sont pas atteints et que les pales disposent par conséquent de la portance et de la durée de vie en service prévues dans la conception.

De plus, les essais de détermination des propriétés des pales sont à effectuer afin de valider certaines hypothèses de calcul essentielles utilisées comme éléments d'entrée des calculs de charges théoriques. Il faut souligner que les essais exigés de propriétés des pales ne couvrent pas toutes les hypothèses de calcul.

Normalement, les essais en vraie grandeur traités dans la présente norme sont des essais effectués sur un nombre limité d'échantillons; seules une ou deux pales d'un type donné sont soumises à l'essai, et de ce fait, aucune distribution statistique de la portance des pales de production ne peut être obtenue. Bien que les essais fournissent des informations valides pour le type de pale, ils ne peuvent remplacer ni un processus de conception rigoureux, ni le système qualité applicable à la production de pales en série. De plus, les essais décrits dans la présente norme ne sont pas destinés à être utilisés pour les essais de fonctionnement des mécanismes, ni pour établir des données de calcul de base relatives à la résistance ou à la fatigue des matériaux propres aux pales et/ou aux composants.

5.2 États limites

Il faut connaître un certain nombre d'informations concernant la conception pour établir et évaluer la charge d'essai. Habituellement, les pales sont conçues selon une certaine norme ou un certain code de bonne pratique comme l'IEC 61400-1 qui utilise les principes de l'ISO 2394 qui définissent les états limites et les coefficients partiels à appliquer afin d'obtenir les valeurs de calcul correspondantes. Un état limite est un état de la structure et des charges qu'elle subit, au-delà duquel la structure ne satisfait plus aux exigences de conception. Les coefficients partiels reflètent les incertitudes et sont choisis – au moins en principe – afin de maintenir la probabilité d'atteindre un état limite en dessous d'une certaine valeur indiquée pour la structure. De ce fait, il convient qu'une pale satisfasse à l'essai si l'état limite n'est pas atteint lorsque la pale est exposée à la charge d'essai, représentative de la charge théorique.

L'enveloppe entière des charges théoriques des pales, déduite conformément à l'IEC 61400-1 ou une norme équivalente, constitue la base d'établissement des charges d'essai. La charge d'essai représentative peut être supérieure à la charge théorique afin de tenir compte des autres facteurs d'influence, par exemple, les effets sur l'environnement, les incertitudes d'essai et les variations de production (voir Article 8).

Il pourrait être souhaitable de déterminer les marges réelles par rapport aux états limites dans la mesure où elles peuvent offrir une mesure de la sécurité réelle obtenue pour la résistance de la pale d'essai. Toutefois, l'interprétation de ce type de valeurs n'est pas directe et des méthodes probabilistes sont à appliquer. La présente norme traite uniquement de l'état limite ultime et de la fatigue.

5.3 Contraintes pratiques

L'exécution pratique des essais est soumise à de nombreuses contraintes à caractère technique et économique. Certaines contraintes, parmi les contraintes les plus importantes, sont énumérées ci-dessous:

- la charge répartie sur la pale peut être simulée uniquement de manière approximative;
- la période disponible pour les essais est généralement d'une année voire moins;
- une pale ou quelques pales seulement peuvent être soumises à l'essai;
- certaines défaillances sont difficiles à détecter.

L'essai est un compromis étant donné que ces contraintes sont à traiter de manière à pouvoir utiliser les résultats d'essai finaux pour évaluer les états limites définis.

Concernant l'interprétation des résultats, il convient de se rappeler que la pale utilisée pour les essais est normalement l'une des premières pales d'une production en série qui fera l'objet de modifications évolutives. Des modifications même mineures pourraient compromettre la validité des essais (voir Annexe A).

5.4 Résultats d'essai

Les charges théoriques constituent la base de la charge d'essai. Selon le calcul théorique, la pale doit être capable de supporter la charge théorique. Ces calculs théoriques impliquent un certain nombre d'hypothèses implicites:

- les contraintes ou déformations sont calculées avec précision ou estimées avec prudence;
- les classifications de la résistance et de la tenue en fatigue de tous les matériaux appropriés, ainsi que les détails, sont estimées avec précision ou prudence;
- les formulations de résistance et de fatigue utilisées pour calculer la résistance sont précises ou prudentes;
- la production est conforme à la conception.

Dans un essai en vraie grandeur utilisé comme vérification finale de la conception, la validité des hypothèses susmentionnées est vérifiée de façon simultanée. Lorsqu'une pale présente une défaillance au cours des essais, au moins une de ces hypothèses a été enfreinte, bien que sans analyse supplémentaire la cause de cette défaillance fortuite puisse ne pas être identifiée clairement.

En l'absence de dommage occasionné sur la pale au cours de l'essai et lorsque la structure de la pale et la charge d'essai ont été évaluées correctement, ceci donne une bonne indication du fait que la conception de la pale satisfait à ses exigences. Il convient de noter que les essais de propriété de la pale permettent de vérifier certaines des hypothèses de calcul principales utilisées pour les calculs théoriques.

6 Documentation et procédures applicables à la pale d'essai

Le fabricant de la pale doit enregistrer les preuves documentaires identifiables pour la conception et la construction de la pale d'essai. Il convient que les enregistrements couvrent:

- une identification unique;
- les schémas et spécifications appropriés;
- les plans de stratification et les instructions de travail;
- la liste contenant le nom du fabricant, le type et le numéro d'identification de tous les matériaux importants utilisés;
- le certificat du fournisseur et le rapport de réception du laboratoire de fabrication de la pale pour tous les matériaux importants utilisés;
- les thermogrammes de l'historique de polymérisation pour les résines et les adhésifs thermodurcissables aux emplacements critiques;
- l'analyse calorimétrique différentielle ou tout autre contrôle de la polymérisation;
- les fiches d'enregistrement de la qualité de fabrication signées par la personne responsable;
- le rapport de poids et de centrage détaillant la masse totale et le centre de gravité. Ce rapport doit inclure les informations sur les éléments lâches installés lors de la pesée, par exemple, éléments de liaison des pieds et fluides amortisseurs;
- les rapports de non-conformité pertinents.

Les réparations doivent également être documentées. Il convient que les enregistrements couvrent la liste ci-dessus. Les réparations peuvent être:

- des exemples représentatifs de procédures de réparation des défauts de fabrication et des dommages en service, qui sont qualifiés avec la pale d'essai;
- des réparations effectuées en raison de dommages causés par des charges d'essai plus importantes que les charges cibles (voir 9.3 et 9.4).

Pour les besoins de l'essai, la pale peut faire l'objet de modifications particulières. Au cours des essais de fatigue, les charges peuvent être plus importantes afin de réaliser l'essai dans un délai acceptable. Dans certains cas, l'amplification nécessaire des charges de fatigue peut conduire à une défaillance des surfaces qu'il n'est pas prévu de soumettre à l'essai. Dans ces cas, des modifications particulières de la pale peuvent être prises en considération. La modification peut également être due aux renforcements d'introduction des charges. Toutes les modifications particulières de la pale doivent être documentées.

7 Programme et plans d'essai de la pale

7.1 Surfaces à soumettre à l'essai

Aucun essai unique ne peut appliquer une charge maximale sur l'ensemble de la pale. Il convient d'appliquer au minimum les charges cibles sur toutes les surfaces critiques. Ces surfaces sont présentées à l'Annexe B. Les essais en traînée et en battement peuvent être suffisants – mais ceci doit toutefois être évalué (voir Annexe D).

7.2 Programme d'essai

Le programme d'essai propre à un type de pale doit être constitué au moins des essais suivants dans l'ordre indiqué:

- masse, centre de gravité et fréquences propres (voir 10.4.1 et 10.4.2);
- essais statiques (voir 9.3 et 10.2);
- essais de charge de fatigue (voir 9.4 et 10.3);
- essais statiques post fatigue.

L'essai des autres propriétés de pale peut avoir son intérêt (voir 10.4.3).

Tous les essais effectués dans une direction donnée et sur une surface donnée de la pale doivent être réalisés sur la même partie de pale. La séquence des essais en battement et en traînée peut être exécutée sur deux pales distinctes. Toutefois, si une surface de la pale est critique en raison de la combinaison des charges en battement et en traînée, la séquence d'essais entière doit alors être exécutée sur une seule pale.

Le programme d'essai doit inclure l'inspection de la pale (voir Article 11).

7.3 Plans d'essai

7.3.1 Généralités

Des plans d'essai doivent être établis pour tous les essais individuels compris dans le programme d'essai de la pale. Les plans d'essai doivent inclure une description de la pale, la spécification des charges et des conditions, ainsi que les instruments à appliquer au cours de l'essai.

7.3.2 Description de la pale

La description de la pale dans le plan d'essai doit être suffisante pour s'assurer que la pale est adaptée au banc d'essai et éviter toute surcharge involontaire lors du stockage, de la manutention, du levage, du montage et de l'essai en laboratoire.

Les informations suivantes doivent être fournies:

- géométrie de la pale (de préférence sous forme de schéma):
 - longueur de la pale;
 - répartition de la corde et de la torsion;

- précourbure ou balayage;
- masse et centre de gravité;
- état de surface de la pale;
- détails de montage de la pale:
 - disposition des boulons (y compris les tolérances) et dimension d'interface;
 - taille, type et calibre des boulons;
 - longueur de serrage des boulons;
 - procédure de prétension ou de couple des boulons;
- procédures de levage et de manutention;
- déviations maximales prévues en charge;
- géométrie des profils aux points d'introduction de la charge.

Des informations supplémentaires (telles que la rigidité de la structure de montage) peuvent être exigées selon les spécificités des essais.

7.3.3 Charges et conditions

Le plan d'essai doit inclure les charges cibles, les charges d'essai, les méthodes d'application et la séquence des essais à effectuer. Les conditions ambiantes qui peuvent affecter l'exécution des essais doivent également être indiquées dans le plan d'essai (voir 8.3.3).

7.3.4 Instruments

La position et l'orientation des cellules de mesure, extensomètres, transducteurs de déviation et autres capteurs doivent être spécifiées dans le plan d'essai.

7.3.5 Résultats d'essai prévus

Il est recommandé de fournir des prévisions (déviations, déformations, etc.) correspondant à toutes les mesures de capteurs afin de permettre et de faciliter la planification, l'évaluation et le contrôle de la qualité.

8 Facteurs de charge pour les essais

8.1 Généralités

Divers facteurs de charge sont à prendre en compte dans les essais. Les facteurs issus de la conception sont présentés en 8.2. Hormis ces facteurs, des facteurs de charge d'essai supplémentaires sont à appliquer afin de prendre en compte les effets occasionnés par la méthodologie d'essai. Ces facteurs de charge d'essai sont présentés en 8.3.

8.2 Facteurs partiels de sécurité utilisés dans la conception

8.2.1 Généralités

Les facteurs (ou coefficients) partiels de sécurité sont à inclure dans les calculs théoriques. Conformément à l'IEC 61400-1, ces facteurs incluent:

- γ_m : les facteurs partiels pour les matériaux;
- γ_n : les facteurs partiels pour les conséquences de défaillance;
- γ_f : les facteurs partiels pour les charges.

Dans le calcul théorique, les trois facteurs partiels de sécurité (γ_m , γ_n et γ_f) sont à appliquer. Le produit de ces facteurs partiels représente un chiffre important pour le niveau de sécurité global de la conception. Pour la charge d'essai, seuls γ_f et γ_n affectent la charge d'essai pour les raisons indiquées dans les paragraphes suivants.

8.2.2 Facteurs partiels pour les matériaux

Les données relatives aux matériaux sont normalement basées sur des essais d'échantillons produits et soumis à l'essai dans des conditions de laboratoire.

Les facteurs de conversion des matériaux tiennent compte des différences spécifiques entre les conditions du matériau dans la structure et les conditions pour lesquelles les formulations de la résistance et de la fatigue ont été déduites. Les exemples de ces facteurs de conversion sont les facteurs relatifs aux effets de la taille, à l'humidité, au vieillissement et à la température. Ces facteurs sont appliqués de manière implicite en utilisant les formulations appropriées de résistance et de fatigue au cours de l'évaluation.

Le facteur partiel pour les matériaux, γ_m , est appliqué dans la conception afin de tenir compte des incertitudes des facteurs de conversion et de la possibilité d'écarts défavorables des propriétés de matériaux par rapport aux valeurs caractéristiques. Il convient que ce facteur partiel (γ_m) n'augmente pas les charges d'essai dans la mesure où le matériau constitutif de la pale soumise à l'essai est le matériau réel.

8.2.3 Facteurs partiels pour les conséquences de défaillance

Les facteurs partiels pour les conséquences de défaillance, γ_n , conformément à l'IEC 61400-1, sont des facteurs par lesquels l'importance de la structure et les conséquences de défaillance, y compris la signification du type de défaillance sont prises en compte.¹ La raison en est qu'un composant dont la durée de vie n'est pas assurée (telle qu'une pale) exige un niveau de sécurité contre la défaillance plus élevé qu'un composant dont la durée de vie est assurée. Dans ce cas, l'essai en vraie grandeur doit refléter cette exigence de sécurité supplémentaire. En conséquence, ces facteurs doivent être inclus dans la charge d'essai.

8.2.4 Facteurs partiels pour les charges

Lors de la conception, les facteurs partiels pour les charges γ_f prennent en compte les incertitudes liées aux charges. Par conséquent, la pale d'essai doit être capable de résister à la charge théorique (qui inclut les facteurs partiels appropriés pour les charges).

¹ Certains codes tiennent compte de cet élément en appliquant différents facteurs partiels pour les charges.

8.3 Facteurs de charge d'essai

8.3.1 Variation entre pales

En l'absence de données relatives à la loi de probabilité de défaillance et applicables à la conception de la pale et à la procédure de fabrication particulières, les facteurs de charge d'essai suivants doivent être utilisés:

pour les essais statiques: $\gamma_{su} = 1,1$

pour les essais de fatigue: $\gamma_{sf} = 1,1$

Le facteur de charge statique ci-dessus doit être utilisé pour au moins un des deux essais statiques exigés (pré ou post fatigue). Pour l'autre essai statique, le facteur γ_{su} peut être fixé à 1,0.

8.3.2 Erreurs possibles dans la formulation de la fatigue

La conversion des charges théoriques de fatigue d'origine en charges d'essai de fatigue introduit une incertitude due aux erreurs possibles dans la formulation de la fatigue.

Plus l'essai de fatigue est accéléré, c'est-à-dire plus le nombre de cycles de l'essai de fatigue est réduit, plus l'incertitude associée à la conversion des charges théoriques de fatigue en charges d'essai de fatigue est grande.

Pour les essais de fatigue, ceci doit être pris en compte par l'application du facteur γ_{ef} aux charges d'essai de fatigue. La valeur de γ_{ef} est donnée pour différents nombres de cycles de charge d'essai dans le Tableau 1 ci-dessous (voir Annexe F).

Tableau 1 - Valeurs recommandées pour γ_{ef} pour différents nombres de cycles de charge

Nombre de cycles de charge	γ_{ef}
5×10^5	1,065
1×10^6	1,050
$2,5 \times 10^6$	1,035
5×10^6	1,025
1×10^7	1,015

Pour les essais de fatigue qui utilisent un nombre de cycles de charge différent de ceux donnés dans le tableau ci-dessus, le facteur γ_{ef} est sélectionné avec prudence ou déterminé par interpolation ou extrapolation.

8.3.3 Conditions ambiantes

Généralement, les conditions au niveau de l'installation d'essai sont plus favorables que les conditions de fonctionnement réelles, et par conséquent les conditions de conception. Dans nombre de formulations de la résistance et de la fatigue, l'effet de ces conditions est exprimé par des facteurs. Toutefois, il peut également générer des formulations de résistance ou de fatigue différentes pour les différentes conditions.

Lorsque les conditions d'essai sont plus favorables, ceci conduit à une amplification de la charge d'essai exigée. Le facteur approprié est à vérifier par l'évaluation de la répartition de la charge d'essai, mais la formulation de la résistance ou de la fatigue appropriée est toutefois à appliquer pour les deux conditions (voir Annexe E). Chaque fois que l'effet est donné par des facteurs, ces derniers peuvent être utilisés comme une estimation initiale du facteur nécessaire à l'amplification de la charge afin d'obtenir une charge d'essai équivalente.

8.4 Application des facteurs de charge pour obtenir la charge cible

Pour les essais, la charge théorique est compilée en charge cible. Il convient en théorie que la charge d'essai soit équivalente à la charge cible. La détermination des charges cibles doit être basée sur des formulations de résistance et/ou de fatigue appropriées, ainsi que sur des propriétés élastiques appropriées pour les matériaux utilisés sur les surfaces à soumettre à l'essai.

La charge cible pour l'essai statique est définie comme suit:

$$F_{\text{cible-u}} = F_{\text{du}} \cdot \gamma_{\text{nu}} \cdot \gamma_{\text{su}} \cdot \gamma_{\text{lu}} \quad (1)$$

où

$F_{\text{cible-u}}$ est la charge cible;

F_{du} est la charge théorique (y compris le facteur partiel pour les charges γ_f) (voir 8.2.1);

γ_{nu} est le facteur partiel pour les conséquences de défaillance (voir 8.2.3);

γ_{su} est le facteur de charge d'essai pour la variation entre pales (voir 8.3.1);

γ_{lu} est le facteur de charge d'essai pour les effets sur l'environnement, le cas échéant (voir 8.3.3);

La charge cible pour l'essai de fatigue est définie comme suit:

$$F_{\text{cible-f}} = F_{\text{df}} \cdot \gamma_{\text{nf}} \cdot \gamma_{\text{sf}} \cdot \gamma_{\text{ef}} \cdot \gamma_{\text{lf}} \quad (2)$$

où

$F_{\text{cible-f}}$ est la charge cible;

F_{df} est la charge théorique équivalente des dommages (y compris le facteur partiel pour les charges γ_f) (voir 8.2.1);

γ_{nf} est le facteur partiel pour les conséquences de défaillance (voir 8.2.3);

γ_{sf} est le facteur de charge d'essai pour la variation entre pales (voir 8.3.1);

γ_{ef} est le facteur de charge d'essai pour les erreurs dans la formulation de la fatigue (voir 8.3.2);

γ_{lf} est le facteur de charge d'essai pour les effets sur l'environnement, le cas échéant. En variante, les effets sur l'environnement peuvent être pris en compte dans la conversion des charges théoriques en charges théoriques équivalentes des dommages, le cas échéant (voir 8.3.3).

La détermination des charges théoriques équivalentes des dommages pour la fatigue comprend une ou des formulations S-N appropriées, des procédures de comptage de cycles, un modèle approprié de sommation des dommages, les effets de la valeur R et toutes les autres informations pertinentes.

9 Charge d'essai et évaluation de la charge d'essai

9.1 Généralités

Pour chaque essai, les charges cibles doivent être définies dans le plan d'essai. Des informations suffisantes doivent être fournies afin de pouvoir évaluer avec précision la charge d'essai par rapport à la charge cible. En principe, il convient de fournir les six composantes

de charge, y compris les informations de phase et de fréquence nécessaires pour générer des hypothèses de charge combinées. En fait, les composantes de charge, à savoir les moments en traînée et en battement, sont les composantes les plus importantes. Les charges de cisaillement en traînée et en battement sont normalement prises en compte de manière implicite à cause des moments. Les efforts de torsion et en longueur sont à prendre en compte uniquement pour les pales plus spécialisées. Le système de coordonnées applicable aux composantes de charge doit être clairement spécifié (voir 4.4). Les déviations importantes de la pale au cours des essais entraînent généralement des changements dans la direction de la charge avec l'amplitude (voir Annexe C). Les effets des changements dans la direction de la charge doivent être soigneusement pris en compte lors de la préparation des plans et des rapports d'essai, ainsi que lors de l'estimation des incertitudes selon 10.1.3.

Étant donné qu'il convient que l'essai démontre que la pale peut résister à la charge cible, la charge d'essai doit être évaluée. Il convient de vérifier sur quelles surfaces de la pale, la sévérité de la charge d'essai est effectivement égale ou plus importante que celle de la charge cible. Étant donné que la sévérité de la charge d'essai par comparaison avec la charge cible varie sur la surface de la pale, l'évaluation est en principe à effectuer à tous les emplacements de la surface de la pale à soumettre à l'essai. Certains exemples de l'évaluation d'essai sont présentés à l'Annexe D.

La nature des charges appliquées aux sous-systèmes de pale mécaniques et électriques critiques, tels que les freins d'extrémité de pale et les composants de protection contre la foudre, est souvent différente de celle des charges générales appliquées aux pales, et ces charges peuvent nécessiter une spécification supplémentaire et des essais spécifiques. Dans le cas des mécanismes, il est peu probable que les conditions de charge des essais normalisés soient suffisantes pour qualifier l'intégrité du sous-système. Des essais supplémentaires peuvent être nécessaires pour simuler la charge dans des cas particuliers, y compris un effort de torsion et une charge radiale. Pour les systèmes dont la défaillance peut aboutir à un fonctionnement non sécurisé de l'éolienne, il faut accorder une attention toute particulière à la vérification du niveau approprié d'intégrité de la structure. Il convient que les dommages cumulés ne provoquent pas une défaillance fonctionnelle de ces sous-systèmes. Les charges d'essai des sous-systèmes de pales ne sont pas couvertes davantage dans la présente norme.

9.2 Influence de l'introduction des charges

Dans le cas où la charge d'essai est introduite sous la forme de forces concentrées en un nombre limité d'emplacements (par exemple, aux positions de l'actionneur), les sections où la charge est appliquée sont perturbées et peuvent être renforcées sur une certaine surface par les fixations d'introduction de la charge. Par conséquent, la pale peut ne pas être correctement soumise à l'essai au niveau de ces surfaces et il convient que l'analyse ou l'évaluation n'en tienne pas compte. La longueur (dans le sens longitudinal) de la surface perturbée peut être estimée à partir de calculs ou de mesures.

Il peut être supposé, sans analyse supplémentaire, que cette surface affectée peut s'étendre jusqu'aux trois quarts de la longueur de corde de chaque côté du dispositif. Dans une conception en console, il convient d'accorder une attention particulière aux surfaces sensibles au flambement (par exemple, bord de fuite en compression).

De même, si des modifications particulières sont effectuées pour les besoins de l'essai (voir Article 6), les considérations mentionnées ci-dessus sont pertinentes.

9.3 Essais de charge statique

Dans les essais de charge statique, la surface à soumettre à l'essai doit être chargée selon chacune de ses conditions de charges théoriques les plus sévères, tout en tenant compte des variations dans un grand nombre de pales fabriquées, ainsi que des différences entre les conditions en laboratoire et les conditions ambiantes théoriques (voir 8.3.1 et 8.3.3).

Lorsque différentes répartitions ou orientations des charges sont nécessaires pour représenter les différentes hypothèses de charge extrêmes sur les surfaces à soumettre à l'essai, chacune d'elles doit être appliquée. Pour une présentation des directions de charges, voir l'Article D.1

Il convient de noter que la pale peut être plus vulnérable à certains modes de défaillance lorsqu'une charge résultante, qui n'est pas nécessairement la plus élevée, est appliquée correctement dans une direction particulière. Pour chaque charge, la pale doit résister à la charge maximale pendant la durée spécifiée de la charge. Dans la mesure où la plupart des matériaux de pales courants présentent une réduction de la résistance avec la durée de la charge, la durée de la charge d'essai doit être au moins aussi longue que celle de la charge théorique maximale. Si les informations sur les charges théoriques spécifient une durée bien définie pour la charge maximale appliquée sur la pale, la charge d'essai et la durée doivent être établies directement sur cet élément. Lorsqu'aucune durée de charge d'essai constante n'est indiquée, une durée de 10 s doit alors être la valeur minimale.

Généralement, tous les emplacements sont considérés comme étant soumis à une durée d'essai suffisante si la charge au cours de l'essai de charge statique est supérieure ou égale à la charge cible. Dans le cas de défaillances occasionnées par des charges supérieures aux charges cibles, une réparation est admise avant un essai de fatigue.

Lorsque la pale est soumise à l'essai avec une combinaison de charges, il n'est pas prévu de combiner la charge maximale dans une direction avec la charge maximale dans l'autre direction. En revanche, il convient de combiner la charge maximale dans une direction avec une charge appropriée dans l'autre direction.

9.4 Essais de charge de fatigue

Il faut générer sur les surfaces à soumettre à l'essai une charge d'essai qui produit un dommage par fatigue équivalent à celui occasionné par les charges cibles. Les charges d'essai de fatigue sont généralement choisies de manière à réduire, pour des raisons pratiques, la durée d'essai. Diverses combinaisons de charges dans le sens de la corde et dans le sens de la traînée peuvent être utilisées afin de soumettre à l'essai des surfaces au voisinage de la section de pale complète.

Afin de réduire le nombre de cycles pendant l'essai, il faut normalement augmenter la charge de manière à parvenir à un compromis raisonnable entre des essais réalisés de la manière la plus réaliste possible et l'obtention d'une durée d'essai plus raisonnable.

L'amplification doit conduire au cumul de dommages par fatigue équivalent théorique approprié, compte tenu des limites suivantes:

- les valeurs maximales des contraintes ou déformations peuvent dépasser la résistance statique du matériau et occasionner par conséquent un dommage ou une défaillance statique;
- les contraintes ou déformations peuvent être si importantes que l'hypothèse habituelle de la linéarité entre les forces et les contraintes ne s'applique plus, comme dans le cas du flambement;
- échauffement interne des surfaces soumises à de fortes contraintes.

Ces limites, notamment dans le cas d'une charge d'amplitude variable, peuvent être atteintes avec un facteur d'amplification de charge relativement faible. Dans ce cas, seuls les cycles de charge intermédiaires peuvent être augmentés davantage, et la charge d'essai devient, de ce fait, de plus en plus une charge d'amplitude constante.

Les charges moyennes appliquées au cours des essais de fatigue doivent normalement être le plus proche possible de la charge moyenne dans les conditions de fonctionnement les plus sévères pour la tenue en fatigue.

Les emplacements sont considérés comme étant soumis à une durée d'essai suffisante lorsque le dommage théorique (par exemple, sommation de Miner) au cours de l'essai de fatigue est supérieur ou égal au dommage théorique basé sur la charge cible.

Le dommage d'essai théorique peut être évalué par cumul du dommage issu de tous les essais partiels.

Lorsqu'une certaine surface de la pale présente une défaillance après avoir été l'objet d'un dommage théorique dû à la charge d'essai équivalent ou supérieur au dommage dû à la charge cible, cette surface a satisfait à l'essai. En principe, les essais effectués sur la pale peuvent se poursuivre afin d'atteindre une sévérité égale pour les autres surfaces. Ceci est valide uniquement pour les surfaces qui ne sont pas affectées par une nouvelle répartition des contraintes due au dommage.

Dans le cas de défaillances occasionnées par des charges supérieures aux charges cibles, une réparation est admise. Les conséquences des réparations éventuelles doivent être évaluées.

10 Exigences d'essai

10.1 Généralités

10.1.1 Enregistrements d'essai

Toutes les activités d'essai doivent être consignées dans un journal.

10.1.2 Étalonnage des instruments

Tous les instruments utilisés pour recueillir les données nécessaires à l'évaluation des résultats d'essai doivent être étalonnés. Dans le cas de capteurs et de jauges appliqués qui ne peuvent pas faire l'objet d'un étalonnage indépendant, les spécifications doivent être traçables et la chaîne restante doit être étalonnée. Les procédures de surveillance, étalonnage, maintien et inspection des équipements de mesure et d'essai doivent être développées et mises en œuvre conformément à l'ISO/IEC 17025 ou équivalent. Il convient, lorsque cela est possible, d'effectuer un étalonnage de bout en bout du système, en vérifiant les performances de tous les composants du système. Les procédures doivent indiquer qu'un réétalonnage est à effectuer pour les capteurs qui pourraient être endommagés suite à une défaillance catastrophique de la pale ou des équipements au cours des essais.²

10.1.3 Incertitudes de mesure

Toutes les incertitudes liées aux dispositifs doivent figurer dans le rapport d'essai.

De plus, les incertitudes suivantes doivent être estimées et consignées dans le rapport:

- incertitudes de l'amplitude, de la direction et de l'emplacement de toute charge appliquée;
- incertitudes de l'amplitude, de la direction et de l'emplacement du déplacement;
- incertitudes de l'amplitude, de la direction et de l'emplacement de la déformation mesurée.³

² La défaillance de la pale ou des équipements peut aboutir à la surcharge d'un capteur tel qu'une cellule de mesure. En raison des effets dynamiques importants potentiels, cette surcharge peut être présente pendant une période si courte qu'elle pourrait ne pas être (entièrement) détectée par le système de mesure.

³ La tolérance d'un tensiomètre est généralement inférieure à 1 %. Toutefois, les tensiomètres sont souvent constitués de matériaux bien plus rigides que les revêtements et adhésifs utilisés dans la conception des pales d'éolienne. Ceci implique que la conception des tensiomètres peut avoir une influence sur les relevés lorsque ces tensiomètres sont appliqués sur la surface de revêtements et d'adhésifs épais. Ces relevés à la surface de revêtements et d'adhésifs épais peuvent ne pas être représentatifs pour la déformation des stratifiés sous le

10.1.4 Exigences concernant la fixation des pieds et le banc d'essai

Dans le cas où la surface et la fixation des pieds sont prises en compte pour les essais, les écarts entre le banc d'essai et l'assemblage des pales d'éolienne doivent être évalués.

Il convient de corriger la déviation mesurée de la pale pour la déformation de la fixation des pieds de pale et du banc d'essai. Pour les fréquences propres mesurées, ainsi que pour l'amortissement et les formes de mode mesurés, l'influence du banc d'essai doit être prise en considération. Pour les bancs d'essai relativement rigides (contribution à la déviation de l'extrémité de pale inférieure à 1 %), l'influence du banc d'essai peut être ignorée.

10.1.5 Surveillance des conditions ambiantes

Des enregistrements des conditions ambiantes peuvent s'avérer nécessaires pour quantifier les influences sur la pale d'essai telles que les variations de rigidité, la dérive des extensomètres (particulièrement sur les ponts à un seul élément) ou la dérive d'autres capteurs.

La température doit, au minimum, être enregistrée à l'extérieur et à l'intérieur de la pale et sur la surface de la pale afin d'évaluer la différence entre la température ambiante et la température de la pale. Ces enregistrements doivent être conservés selon des intervalles de temps suffisants pour surveiller les variations au cours de l'ensemble des essais.

Pour les matériaux influencés par l'humidité, l'humidité ambiante doit être enregistrée à des intervalles suffisants pour surveiller les variations au cours de l'essai.

10.1.6 Corrections déterministes

10.1.6.1 Charges de tare

L'essai peut être influencé par les charges gravitationnelles qui ne font pas partie intégrante de la charge d'essai ou qui ne sont pas mesurées par les instruments. Ces charges doivent être correctement prises en compte au cours de l'essai et du traitement des données d'essai.

Les charges de tare peuvent résulter des masses

- de la pale elle-même;
- des fixations d'introduction de la charge (actionneurs, appareillage à palonnier, structures de serrage, etc.);
- des câbles, élingues et transducteurs.

Les charges de tare et leur emplacement par rapport au système de coordonnées de la pale doivent être documentés.

10.1.6.2 Variations des angles de charges

La déviation de la pale peut générer un changement de direction des charges par rapport à l'orientation de la pale. Ces changements de direction des charges doivent être pris en compte. Ceci est expliqué plus en détail à l'Annexe C.

10.1.6.3 Efforts de torsion induits

Les charges qui n'influencent pas sur l'axe élastique en raison d'une déviation, d'une précourbure ou de la configuration d'essai occasionnent des moments de torsion dans la pale. Ces moments peuvent être importants et il convient d'en tenir compte au moment de la

revêtement ou l'adhésif. L'application de tensiomètres de grandes dimensions ou le retrait du revêtement par grattage peut réduire la différence entre le relevé des tensiomètres et la déformation effective des stratifiés.

spécification de la charge d'essai. Les charges appliquées peuvent être volontairement décalées par rapport à l'axe élastique afin de générer un moment de torsion spécifié.

10.2 Essai statique

10.2.1 Généralités

L'essai au moyen de charges statiques est réalisé pour obtenir deux types d'informations distincts. Un premier ensemble d'informations se rapporte à la capacité de résistance de la pale aux charges pour lesquelles elle a été conçue. Le second ensemble d'informations se rapporte aux propriétés, déformations et déviations de la pale issues des charges appliquées. Pour des raisons pratiques, les deux ensembles d'informations sont habituellement obtenus lors du même essai statique, bien que cela ne soit pas une exigence normative.

10.2.2 Essai de charge statique

Au cours de l'essai de charge statique, les éléments suivants doivent être mesurés (ou déduits d'une mesure) et enregistrés:

- l'amplitude et la direction de la ou des charges appliquées aux cinq niveaux de charge auxquels les déformations sont mesurées (voir 10.2.3);
- un signal horaire – afin d'assurer une durée minimale à un niveau de charge (voir 9.3). Ceci peut prendre la forme d'un signal horaire réel ou peut être déduit de la fréquence d'échantillonnage.

10.2.3 Mesure des déformations

Les déformations de la pale du rotor doivent être mesurées sur les surfaces d'intérêt. Les extensomètres constituent le dispositif préférentiel utilisé pour ces mesures. Selon les surfaces d'intérêt, les déformations dans une ou plusieurs directions doivent être mesurées. Au minimum, les déformations au niveau des surfaces d'intérêt suivantes doivent être mesurées:

- la structure portante principale (semelle de longeron, bride de poutre) du boîtier supérieur et inférieur, au niveau de quatre sections réparties sur la surface à soumettre à l'essai. La direction de mesure des déformations est généralement longitudinale à l'axe en envergure de la pale, mais peut également être différente comme exigé par la vérification des modèles;
- les bords d'attaque et de fuite à la position de la longueur de corde maximale et à mi-longueur de la pale. La direction de mesure des déformations est généralement parallèle aux bords de la pale, mais peut également être différente comme exigé par la vérification des modèles;
- les âmes à la surface des pieds de pale et sur une section d'âme avec une déformation calculée élevée. Un cisaillement constitue la mesure de déformation importante exigée et généralement des extensomètres en rosette sont utilisés;
- les deux boulons d'assemblage soumis aux charges les plus importantes, lorsque les boulons font partie intégrante de la surface à soumettre à l'essai. La tension et la flexion des boulons doivent toutes deux être mesurées.

Les autres surfaces d'intérêt pour les mesures des déformations se situent généralement aux emplacements de pales qui comportent des transitions géométriques et des détails de conception critiques, ou le niveau de déformation est censé être élevé.

L'emplacement et l'orientation des mesures des déformations individuelles doivent être documentés avec précision. Les mesures des déformations doivent être réalisées pour au moins cinq niveaux de charge, répartis sur la plage de charges utilisée dans l'essai.

10.2.4 Mesure de la déviation

La déviation doit être mesurée en un certain nombre de points appropriés permettant de déterminer la déviation sur toute la longueur de la pale, mais en trois emplacements au moins. Les déviations en battement doivent être mesurées en un nombre suffisant d'emplacements et avec des charges suffisamment élevées pour valider les calculs théoriques de déviation de l'extrémité de pale.

10.3 Essai de fatigue

Lors des essais de fatigue, les éléments suivants doivent être mesurés et enregistrés:

- le nombre de cycles;
- les signaux utilisés pour contrôler l'essai effectué sur la pale (par exemple, charges appliquées, déviations, accélération, déformations).

La fonctionnalité des capteurs doit être vérifiée pendant toute la durée de l'essai. En cas de défaillance d'un capteur ou d'un instrument au cours de l'essai de fatigue, sa criticité pour l'essai doit être évaluée. Les capteurs ou instruments critiques pour l'essai de fatigue doivent être réparés ou remplacés. Afin de démontrer que les hypothèses propres à l'essai de fatigue sont toujours valides, il convient de vérifier et de documenter plusieurs fois (par exemple, 5) la rigidité de la pale pendant toute la durée de l'essai.

10.4 Autres essais de propriétés de la pale

10.4.1 Masse de la pale et centre de gravité

La masse de la pale et l'emplacement en envergure du centre de gravité doivent être déterminés. Les sous-composants inclus (par exemple, boulons de fixation des pieds) doivent être indiqués.

10.4.2 Fréquences propres

Au minimum, la première fréquence et la seconde fréquence dans le sens de la corde et les premières fréquences dans le sens de la traînée doivent être mesurées. La masse des instruments d'essai peut influencer les résultats des essais de fréquences propres.

10.4.3 Essais facultatifs de propriétés de la pale

Les essais des autres propriétés de la pale peuvent avoir leur intérêt. Celles-ci peuvent comprendre (sans toutefois s'y limiter):

- l'amortissement;
- les formes de mode;
- le fluage;
- la distribution massique;
- la répartition de la rigidité.

11 Évaluation des résultats d'essai

11.1 Généralités

Avant de lancer le programme d'essai, après chaque essai et à des intervalles fréquents au cours de l'essai de fatigue, la pale doit faire l'objet d'une inspection visuelle tant du côté intérieur que du côté extérieur.

Une inspection à l'infrarouge ou un contrôle par ultrasons et un enregistrement d'émission sonore peuvent être utilisés pour compléter l'inspection visuelle.

Les résultats d'inspection doivent être documentés dans le journal. Les observations doivent être accompagnées d'une documentation appropriée.

Le bon fonctionnement des systèmes critiques à montage ou intégration électrique tels que les paratonnerres ou les détecteurs de commande doit faire l'objet d'une inspection et d'une vérification régulières pendant toute la durée du programme d'essai.

A l'Article 11, les changements de propriétés irréversibles de la pale sont considérés comme un dommage. Les types de dommage suivants sont définis:

- dommage sous forme de défaillance catastrophique de la pale d'essai;
- dommage sous forme de déformation permanente, de perte de rigidité ou de changement des autres propriétés de la pale;
- dommage superficiel.

Le dommage observé doit être pris en considération par le concepteur dans l'évaluation d'une défaillance (voir 11.5).

Pour des analyses approfondies effectuées après l'essai, la pale peut être divisée en sections.

11.2 Défaillance catastrophique

Il s'agit du bris ou de l'effondrement d'un composant ou de la pale d'essai complète. La défaillance catastrophique entraîne la perte d'une fonction vitale, avec des conséquences pour la sécurité. Les observations suivantes peuvent être considérées comme étant une défaillance catastrophique:

- la rupture ou l'effondrement de la structure principale de la pale;
- la défaillance complète des éléments de structure tels que les axes de liaison internes ou externes, les revêtements, les âmes de cisaillement, les dispositifs de fixation des pieds, etc.;
- les parties importantes se détachent de la structure principale.

Toute défaillance catastrophique est normalement observée de façon immédiate.

Les observations doivent être documentées par une description écrite et un enregistrement sous la forme d'une photographie ou d'une vidéo.

11.3 Déformation permanente, perte de rigidité ou changement des autres propriétés de la pale

La masse, le centre de gravité et les fréquences propres mesurés avant l'essai statique (voir 7.2, 10.4.1 et 10.4.2) doivent être évalués par rapport aux hypothèses de calcul. Les autres propriétés de la pale mesurées telles que décrites aux 10.2.3 et 10.2.4 (répartition des déformations et déviation) doivent être évaluées tant après l'essai statique, qu'après l'essai statique post fatigue.

La mesure des charges, déviations, déformations et/ou fréquences propres selon 10.2.2, 10.2.3, 10.2.4 et 10.4.2 doit être évaluée afin de déceler la perte de rigidité et/ou la déformation permanente potentielles.

11.4 Dommage superficiel

Le marquage de la durée et de l'étendue des dommages à la surface des pales doit servir de référence lors de l'observation de l'évolution des dommages tout au long du programme d'essai.

Les exemples suivants d'observations peuvent être considérés comme des dommages superficiels:

- petites craquelures dans les stratifiés ou les axes de liaison;
- fissure d'enduit gélifié;
- écaillage des peintures;
- bulles superficielles;
- flambement léger des panneaux sans déformation ou dommage permanent;
- petites délaminations.

Dans le cas où la réparation des dommages superficiels quels qu'ils soient est décrite dans le manuel d'utilisation et de maintenance dédié au type de pale, il est admis de réparer ces dommages pendant les essais. Par exemple, cela peut être le cas pour les petites craquelures dans les stratifiés ou les axes de liaison, les fissures d'enduit gélifié ou l'écaillage des peintures. Si des réparations sont effectuées, il faut les documenter selon l'Article 6.

11.5 Évaluation des défaillances

Tout dommage sous la forme d'une déformation permanente ou d'une perte de rigidité peut être catastrophique ou occasionner la défaillance fonctionnelle d'une pale en service.

Un dommage superficiel peut évoluer en défaillance fonctionnelle ou catastrophique dans la durée dans des conditions ambiantes auxquelles sont soumises les pales en service.

Le concepteur doit évaluer les dommages observés au cours des essais statiques initiaux et des essais de fatigue, et déterminer leur impact sur la sécurité par rapport à une défaillance catastrophique ou fonctionnelle. La base de cette évaluation n'est pas couverte par la présente norme.

12 Rapport

12.1 Généralités

Les essais doivent être documentés dans un rapport contenant suffisamment d'informations pour que les essais et leurs résultats soient compréhensibles.

12.2 Contenu de rapport d'essai

Le ou les rapports d'essai doivent inclure les éléments suivants, selon le type d'essai:

- une table des matières;
- le nom du maître d'œuvre pour l'essai;
- les dates et emplacements des essais;
- l'identification de la pale;
- la description de la pale;
- la configuration et les procédures d'essai;
- la description de la charge d'essai;
- l'équipement d'essai utilisé (y compris la marque, le modèle, les numéros de série, etc.);
- la référence aux enregistrements d'étalonnage des appareils de mesure;
- les emplacements des capteurs et des points de mesure;
- les détails d'étalonnage spécifiques à la pale (charges de tare, déformations, etc.);
- les incertitudes estimées;

- la description des inspections, réparations et observations;
- la synthèse des essais et résultats d'essai;
- les écarts par rapport aux plans d'essai, procédures de laboratoire ou références normatives;
- la liste des références (plans d'essai, procédures de laboratoire, références normatives).

12.3 Évaluation de l'essai par rapport aux exigences de conception

L'évaluation de l'essai par rapport aux exigences de conception doit au moins comprendre:

- l'évaluation des charges d'essai y compris leur répartition;
- l'évaluation des résultats d'essai eu égard à la base de calcul;
- l'évaluation de la rigidité de la pale.

IECNORM.COM : Click to view the full PDF of IEC 61400-23:2014

Annexe A **(informative)**

Lignes directrices relatives à la nécessité de procéder à de nouveaux essais statiques et de fatigue

En raison des ajustements de la production, des améliorations de conception et des optimisations en général, les pales de rotor de production s'écartent souvent de la pale utilisée initialement pour les essais en vraie grandeur.

Étant donné que la pratique ne permet pas de répéter l'essai en vraie grandeur chaque fois que des ajustements et des améliorations sont effectués, il est nécessaire de différencier les changements qui exigent ou non un renouvellement de l'essai en vraie grandeur. Alors que les exigences de cette nature ne relèvent pas du domaine d'application de la présente norme, et sont laissées à l'appréciation du fabricant et/ou de l'organisme de certification, certaines considérations sont données ci-dessous.

Il convient de tenir compte des observations issues de l'essai en vraie grandeur précédent, puisque celles-ci peuvent indiquer le caractère approprié des hypothèses de calcul et s'avérer intéressantes pour évaluer la nécessité d'effectuer de nouveaux essais. Compte tenu du niveau de changement, la nécessité de procéder à de nouveaux essais en vraie grandeur peut comprendre uniquement un essai en vraie grandeur limité, par exemple, essai statique uniquement, essai de fatigue uniquement, essai dans une seule direction, etc.

Généralement, les ajustements et les améliorations qui renforcent sans conteste la pale ont tendance à réduire la nécessité de procéder à de nouveaux essais en vraie grandeur. Par ailleurs, il convient que les changements affectant uniquement les surfaces avec des marges de sécurité importantes soient moins enclins à imposer la nécessité de procéder à de nouveaux essais en vraie grandeur. Toutefois, il convient de prendre en considération les changements qui influencent la charge de l'éolienne et de ce fait les hypothèses de calcul pour la pale.

Le Tableau A.1 donne des exemples d'ajustements et d'améliorations de la production et de la conception exigeant généralement ou non de procéder à de nouveaux essais en vraie grandeur.

Tableau A.1 – Exemples de situations exigeant généralement ou non de procéder à de nouveaux essais

Ajustements et améliorations exigeant généralement de procéder à de nouveaux essais en vraie grandeur	Ajustements et améliorations n'exigeant généralement pas de procéder à de nouveaux essais en vraie grandeur
Forme de profil modifiée au voisinage de surfaces soumises à essai significatives (par exemple, corde la plus grande)	Forme modifiée des extrémités de pales
Raccourcissement de certaines couches de fibres	Allongement de certaines couches de fibres
Adoption d'un nouveau type de résine ou de fibres (par exemple, passage de fibres de polyester en résine époxyde, ou de fibres de verre en fibres de carbone)	Ajustements mineurs des matières premières comme partie intégrante du développement continu par le fournisseur des matières ou appel à un nouveau fournisseur de matières premières identiques. Dans ce dernier cas, des essais sur des éprouvettes peuvent s'avérer nécessaires.
Adoption d'un nouveau type de matériau noyau avec différents modules de Young ou de cisaillement dans les constructions en sandwich. (Souvent combiné à une modification de l'épaisseur du matériau noyau).	Modification de l'angle du chanfrein dans certains matériaux noyaux d'une construction en sandwich.
Changements majeurs des séquences d'empilage des constructions en sandwich	Changements mineurs des séquences d'empilage des stratifiés massifs
Adoption d'une nouvelle méthode de production (par exemple, passage d'une méthode de moulage par contact à une méthode par injection)	Changements mineurs du processus de production (par exemple, ajustements apportés au cycle de polymérisation)

Outre les ajustements et les changements apportés à la structure des pales, le cas peut se présenter où les charges théoriques pour une pale donnée varient une fois réalisé l'essai en vraie grandeur de la pale. Dans ce cas, il n'est nécessaire de procéder à de nouveaux essais en vraie grandeur que si les charges théoriques augmentent. En cas de variation des charges théoriques, une nouvelle évaluation des charges d'essai par rapport aux charges théoriques doit être réalisée.