

EXPERIMENTAL PROCEDURE FOR THE CHARACTERIZATION OF CYCLIC
BEHAVIOR FROM VERY THIN PLATE SPECIMENS

D. MOULIN - A. MAURY

Commissariat à l'Energie Atomique DENT, C.E.N. Saclay
91191 GIF-SUR-YVETTE CEDEX

§

SUMMARY

Many investigators, for example those involved in the INTERNATIONAL BENCHMARK PROJECT ON SIMPLIFIED METHODS FOR ELEVATED TEMPERATURE DESIGN AND ANALYSIS - PROBLEM II, tried to reproduce by inelastic calculations the experimentally observed behavior. Unfortunately, the material characteristics used in the computer code were established from monotonic tensile tests performed with specimens extracted from the plate product itself (1,45 mm thick) employed to construct the ratchetting specimen. It seems that, at the present time, cyclic behavior of the material is much more relevant to the observed phenomenon. So the need is expressed to make this kind of characterization.

Nevertheless, the practical problem is to produce cyclic stresses, i.e. tensile and compressive stresses, with very thin specimen. The main difficulty is, in particular, to prevent buckling effect.

It is described a new special device set up for this particular purpose. The adopted solution was to create uniformly distributed alternative pure bending stresses in the thin plate specimen.

The bending moments are produced by two end-grips fixed to the specimen, and these grips are mounted on a conventional test-machine which is displacement-controlled. In order to reduce tensile and compressive membrane stresses inside the specimen, the grips have two parallel axes of rotation. Forces produced by the machine and displacements of a few points of the specimen are continuously recorded during the test, so that cyclically stabilized bending moment can be easily evaluated for each variation of curvature imposed.

It is furnished the very first experimental cyclic data obtained for the material of the sodium test specimen, a 316 type stainless steel, at room temperature.

Finally it is worth noticing that the specimen are of very simple fabrication and are for this reason not expensive.

1 - INTRODUCTION

Les structures mécaniques de l'enceinte principale d'un réacteur à neutrons rapides de type piscine sont pour la plupart des enveloppes cylindriques d'épaisseur faible et de grand rayon, dont le chargement le plus important à considérer, en situation normale de fonctionnement, est d'origine thermique.

Ainsi l'analyse mécanique de tels composants porte une attention toute particulière sur l'évaluation de dommages liés aux phénomènes cycliques, notamment la fatigue et la déformation progressive. Il faut noter de plus que les températures rencontrées, étant en général assez élevées, les phénomènes liés au fluage viennent accélérer ces deux dommages.

L'étude présentée ici a permis la mise au point d'un dispositif économique et original d'essai pour déterminer les caractéristiques mécaniques cycliques du matériau à partir d'une tôle de faible épaisseur. Une autre partie de cette tôle a servi à construire une coque cylindrique circulaire qui a été soumise à des variations axiales cycliques de température et une charge primaire axiale constante, en vue de produire un comportement de déformation progressive [1]. En d'autres termes il a été mis au point un dispositif d'essai qui vise à déterminer certains paramètres d'une équation constitutive du matériau qui pourrait permettre de modéliser par le calcul le comportement en déformation progressive mis en évidence expérimentalement.

2 - MODELISATION DU COMPORTEMENT CYCLIQUE

2.1 - Ecrouissege cyclique

Dans l'étude des phénomènes comme la déformation progressive où les sollicitations cycliques jouent un grand rôle, la caractérisation du comportement du matériau est difficile à réaliser et il faut admettre que les équations constitutives, mises au point jusqu'à présent, ne présentent qu'imparfaitement la complexité des mécanismes qu'elle met en oeuvre. En outre il est nécessaire de disposer de résultats expérimentaux spéciaux qui permettent d'ajuster certains paramètres de ces équations constitutives. En ce qui concerne l'étude présentée ici, l'attention est centrée sur les propriétés d'écrouissege cycliques par déformation imposée répétées en dehors du domaine où le fluage se manifeste.

2.2 - Courbes de consolidation cyclique

Habituellement les caractéristiques obtenues expérimentalement et utilisées pour ajuster les paramètres cycliques d'une équation constitutive reposent sur des essais de traction-compression uni axial à déformation imposée symétrique ($-\epsilon, +\epsilon$) sur des éprouvettes lisses (figure 1.a). Au cours du cyclage, les valeurs absolues de la contrainte aux extrémités du cycle augmentent pour se stabiliser au bout de quelques dizaines de cycles à des quantités ($\sigma_{\max}^-, \sigma_{\max}^+$). En recommençant ce type d'essai sur la même éprouvette pour des valeurs ($-\epsilon, +\epsilon$) différentes et plus grandes que la précédente il peut être trouvé les nouvelles quantités ($\sigma_{\max}^-, \sigma_{\max}^+$) à la stabilisation. L'usage est d'appeler courbe de consolidation cyclique la courbe lien des maxima de contrainte correspondant à une variation de déformation donnée. Il faut aussi noter que parfois cette courbe est tracée en prenant des systèmes d'axes différents par exemple les coordonnées ($\Delta\epsilon = |\epsilon^+| + |\epsilon^-|, \Delta\sigma = |\sigma_{\max}^+| + |\sigma_{\max}^-|$) qui utilisent les variations de déformation et de contrainte, ou les coordonnées ($\frac{\Delta\epsilon}{2} = \frac{|\epsilon^+|}{2} + \frac{|\epsilon^-|}{2}, \Delta\sigma = \frac{|\sigma_{\max}^+|}{2} + \frac{|\sigma_{\max}^-|}{2}$) qui utilisent les demies variations de déformation et de contrainte.

2.3 - Courbe moment-courbure cyclique

Les éprouvettes pouvant servir à caractériser expérimentalement le comportement cyclique du matériau ayant servi à faire l'essai de déformation progressive sur maquette, doivent être extraites d'une tôle qui ne fait que 1,45 mm d'épaisseur. Ainsi il n'est pas possible d'effectuer le type d'essai décrit ci-dessus car il est fort à craindre que le flambage apparaisse au moment de la mise en compression d'une éprouvette à section rectangulaire d'épaisseur aussi faible.

En conséquence il a été choisi d'effectuer des essais de flexion cyclique à variation de courbure constante. Il est alors visé de déterminer la courbe moment-courbure cyclique analogue à la courbe contrainte-déformation cyclique en sollicitant une éprouvette à des variations de courbures symétriques ($-\chi, +\chi$) de façon à obtenir les valeurs maximales du moment stabilisé (M_{\max}^-, M_{\max}^+) (figure 1.b).

3 - REALISATION PRATIQUE DES ESSAIS DE FLEXION CYCLIQUE

3.1 - Principe de l'essai

Conformément à la caractérisation du comportement cyclique visée, la difficulté expérimentale principale du montage d'essai à réaliser est de produire de la flexion pure sur toute la longueur d'une éprouvette de faible épaisseur, de sorte que son état mécanique puisse être simplement et totalement défini par les quantités à mesurer :

- M moment de flexion en MPa.m.
- χ variation de courbure en m^{-1} .

Afin de documenter expérimentalement le domaine de déformation correspondant à l'essai de déformation progressive [1] il est souhaité de réaliser des variations de déformation totale supérieure à 1 %.

3.2 - Eprouvette

Des essais préliminaires ont montré que, pour le montage d'essai choisi, une flexion relativement bien réparties sur la longueur de l'éprouvette est obtenue avec les dimensions précisées dans la figure 2. Dans cette pré-étude il avait été cherché d'éviter pour les courbures considérées une concentration de déformation trop importante dans le voisinage des deux encastres où les extrémités de l'éprouvette sont fixées.

Le matériau est en acier austénitique 316 CN. L'éprouvette est usinée uniquement sur la périphérie. L'état de surface est donc celui résultant du laminage à chaud effectué pour produire la tôle. Il faut donc noter que ce type d'éprouvette est de conception très simple, elle est donc très économique.

3.3 - Montage d'essai

Le montage d'essai permettant de solliciter l'éprouvette fine, à l'aide d'une machine d'essai conventionnelle, asservie en déplacement, est schématisé dans la figure 2. Il est constitué de deux mors où vient s'ajuster l'éprouvette percée de deux trous, de deux axes permettant la rotation et de deux chapes fixées sur les traverses de la presse. Seule la traverse supérieure est mobile.

Il est à noter que les dimensions ont été choisies afin de permettre des variations de courbures assez importantes tout en limitant les efforts de membrane dans l'éprouvette. Il a été recherché de limiter les frottements au niveau des axes.

3.4 - Instrumentation (figure 2)

3.4.1. Mesure de l'effort

L'effort vertical (F) transmis par la machine d'essai pour assurer les conditions de déplacement imposées est enregistré graphiquement et de manière continue au cours de l'essai cyclique à l'aide d'une cellule installée sur la machine.

3.4.2. Mesure des déplacements

Le déplacement horizontal de trois points particuliers liés à la fibre neutre de l'éprouvette (au milieu (d_3) et aux deux encastremets (d_1 et d_2)), est enregistré graphiquement et de manière continue au cours de l'essai à l'aide de trois capteurs munis de plaquette verticale permettant un glissement vertical sans frottement.

3.4.3. Déplacement imposé de la machine d'essais

Le principe des essais envisagés amène à asservir le déplacement de la presse de manière cyclique entre une position moyenne initiale (éprouvette droite) et deux positions extrémales (traction et compression). Il faut noter que les positions extrémales ne sont pas symétriques par rapport à la position moyenne parce que seule la traverse supérieure de la machine d'essais est mobile.

Dans les essais présentés ici les déplacements minimaux et maximaux pour chacune des courbures prévues ont été déterminées par des essais préliminaires où l'on a contrôlé les flèches produites en traction et en compression pour obtenir de la flexion cyclique symétrique et des variations de déformation sur la peau supérieure à 1 %.

4 - EXPERIENCE REALISEE

A l'aide du montage d'essais mis au point il a été possible de réaliser un essai de détermination de courbe moment-courbure cyclique à l'aide d'une première éprouvette.

Ainsi les quantités indiquées par la suite doivent elles être considérées à titre qualitatif et visent à donner une première appréciation des résultats et un exemple de dépouillement.

4.1 - Essai monotone

Ce type d'essai consiste à solliciter une éprouvette, vierge initialement, par déplacement de la traverse de la presse vers le haut ou le bas jusqu'à la courbure maximale recherchée.

Les quantités enregistrées en fonction du temps sont alors du type de celles présentées par la figure 3 a pour les trois enregistrements de déplacement horizontal de l'éprouvette et par la figure 3 b pour l'effort produit.

4.2 - Essai cyclique

Ce type d'essai consiste à solliciter l'éprouvette jusqu'à la courbure maximale dans un sens par une méthode analogue à celle décrite en 4.1, puis à la solliciter dans l'autre sens pour la même courbure et ainsi de suite pendant une trentaine de cycles (ce chiffre a été choisi parce que les essais préliminaires ont montré que la consolidation cyclique était atteinte assez rapidement).

Il faut noter que dans ce cas on a besoin que des mesures de déplacement et de l'effort mesurés au moment où la courbure est extrême. Par contre il convient de solliciter l'éprouvette à des courbures cycliques différentes par bloc (voir 2.2).

Les figures 4 a et 4 b montrent les résultats expérimentaux, analogues à l'essai monotone, obtenus dans ce cas. Il est à noter que la consolidation cyclique est très faible.

5 - COURBE MOMENT - COURBURE EXPERIMENTALE

Les résultats expérimentaux obtenus sont des déplacements horizontaux et des efforts verticaux alors qu'il est souhaité de disposer de lois expérimentales reliant le moment transmis à l'éprouvette en fonction de la courbure imposée. Pour atteindre ce but il est nécessaire de déterminer les quantités utiles à l'aide des calculs présentés ci-dessous :

5.1 - Calcul de la flèche centrale

L'éprouvette étant droite et verticale à l'origine la flèche au milieu de l'éprouvette est donnée par la formule :

$$f = d_3 - \frac{d_1 + d_2}{2} \quad (d_1, d_2, d_3 \text{ voir figure 2}).$$

5.2 - Demi angle de rotation (voir figure 2)

$$\alpha = \frac{4f}{l} \quad (l \text{ longueur utile de l'éprouvette } 50 \text{ mm}).$$

Cet angle est inférieur à 0,35 rd, ce qui justifie les simplifications utilisées pour mettre en place les formules établies ici.

5.3 - Rayon de courbure

Si on admet que la déformée de la fibre neutre de l'éprouvette est parfaitement circulaire le rayon de courbure est donné par la formule :

$$R = \frac{l^2}{8f} \quad \text{d'où la courbure } \chi = \frac{1}{R} = \frac{8f}{l^2}$$

5.4 - Calcul du moment

La distance de la fibre neutre la plus chargée de l'éprouvette à la direction de l'effort vertical transmis par la presse est donnée par les formules :

$$d_c = 54 + |d_3| \quad \text{en compression}$$

$$d_t = 54 - |d_3| \quad \text{en traction}$$

d'où les moments extrêmes en compression et en traction respectivement :

$$M_c = F_c \times d_c$$

$$M_t = F_t \times d_c$$

6 - DETERMINATION ANALYTIQUE DE LA COURBE σ - ϵ A PARTIR D'UNE COURBE M - χ AJUSTEE SUR DES RESULTATS EXPERIMENTAUX

Dans une éprouvette soumise à une flexion pure (figure 5) uniforme sur sa longueur et caractérisée par la courbure χ , si la répartition de contrainte en résultant est uniaxiale et répartie symétriquement par rapport à la surface moyenne le moment M produit est [2] :

$$M = 2b \int_0^{\epsilon/2} \sigma(y) dy \quad (1)$$

Si la déformation ϵ à la distance y de la surface moyenne est donnée par la formule :

$$\epsilon = y\chi \quad (2)$$

l'expression du moment s'écrit :

$$M = \frac{2b}{\chi^2} \int_0^{e\chi/2} \sigma(\epsilon) d\epsilon \quad (3)$$

Pour un accroissement $d\chi$ de la courbure l'accroissement dM du moment sont données par la formule :

$$\frac{d \frac{M\chi^2}{2b}}{d\chi} = \frac{d \int_0^{e\chi/2} \sigma(\epsilon) d\epsilon}{d\chi} \quad (4)$$

qui, tous calculs faits, fournit la relation fondamentale :

$$\sigma(\epsilon) = \frac{2}{be^2} \frac{1}{\chi} \frac{dM\chi^2}{d\chi} \quad (5)$$

où σ est la contrainte en peau (pour $y = \pm \frac{e}{2}$) et correspondant donc à la déformation $\epsilon = \frac{e}{2} \chi$.

On a coutume d'écrire la relation (5) sous la forme plus pratique :

$$\sigma = \frac{M}{\frac{be^2}{4}} \left(1 + \frac{1}{2} \frac{d \text{ Log } M}{d \text{ Log } \chi} \right) \quad (6)$$

expression qui montre que la contrainte en peau est la somme d'une fonction linéaire du moment et d'une "fonction correctrice" proportionnelle à la pente de la courbe Log M - Log χ pour la valeur du moment considéré.

Ainsi si la courbe-moment courbure expérimentale peut être ajustée par une courbe d'équation $M = K\chi^n$ le terme correctif est alors $\frac{n}{2} M$ d'où l'écriture particulière et suffisante dans les cas pratiques :

$$\sigma = \frac{M}{\frac{be^2}{4}} \left(1 + \frac{n}{2} \right) \quad (7)$$

correspond à la déformation :

$$\epsilon = \frac{e}{2} \chi \quad (8)$$

Il sera donc fait l'hypothèse pour l'application proposée ici que le même type de relation existe entre la variation des quantités σ , ϵ , M et χ puisque ce sont les caractéristiques cycliques qui nous intéressent.

7 - UN EXEMPLE D'APPLICATION DE LA PROCEDURE DE DEPOUILLEMENT

Le tableau 1 rassemble les résultats expérimentaux obtenus sur une éprouvette :

- . $\Delta\chi$ est la variation de courbure imposée,
- . N est le nombre de cycles effectués à la courbure $\Delta\chi$,
- . ΔM est la variation du moment mesuré au bout des N cycles,
- . $\Delta\epsilon$ est la variation de déformation calculée par la formule ().

La courbe cyclique $\Delta M - \Delta\chi$ expérimentale obtenue est reproduite dans la figure 5 où les points expérimentaux sont représentés par des croix.

En ajustant la courbe moment-courbure dans la partie non linéaire par une courbe d'équation :

$$\Delta M = K \Delta x^n$$

pour les résultats présentés ici on trouve :

$$n = 0,127$$

d'où la courbe continue moment-courbure ajustée reproduite dans la figure 5 représentée par une loi en puissance.

De même on a pu tracer, si on admet que l'équation (1) est applicable de la même façon entre la variation de contrainte sur la peau et la variation du moment, la courbe $\frac{\Delta \sigma}{2}$, $\frac{\Delta \epsilon}{2}$ dans la figure 6.

Des essais de traction monotone ayant été réalisés sur la même tôle [1] ont montré que la limite d'élasticité à conventionnelle était de l'ordre de 350 MPa. A l'aide de la courbe $\frac{\Delta \sigma}{2}$, $\frac{\Delta \epsilon}{2}$ on trouve que pour une déformation plastique de 0,2 % la contrainte est de 580 MPa. Ce qui semblerait montrer une différence sensible entre les deux types de sollicitations.

5 - CONCLUSIONS

- Un dispositif simple et économique d'essais permettant de déterminer des caractéristiques cycliques du matériau sur des éprouvettes de faible épaisseur, a été mis au point et a déjà fourni des premiers résultats satisfaisants sur une première série d'essais sur une éprouvette.
- Il a été montré que la consolidation cyclique mesurée à l'aide du moment, était faible pour le matériau concerné.
- Les courbes moment-courbure du matériau sont plus représentatives pour le calcul d'une structure dont le mode principal de sollicitation est la flexion.
- Les courbes contrainte-déformation cycliques peuvent être calculées à partir des courbes moment-courbure cycliques.
- Les valeurs des paramètres, mesurant la consolidation cyclique, données ici sont à considérer à titre d'exemple et devront être ajustées à l'aide d'essais analogues ultérieurs.

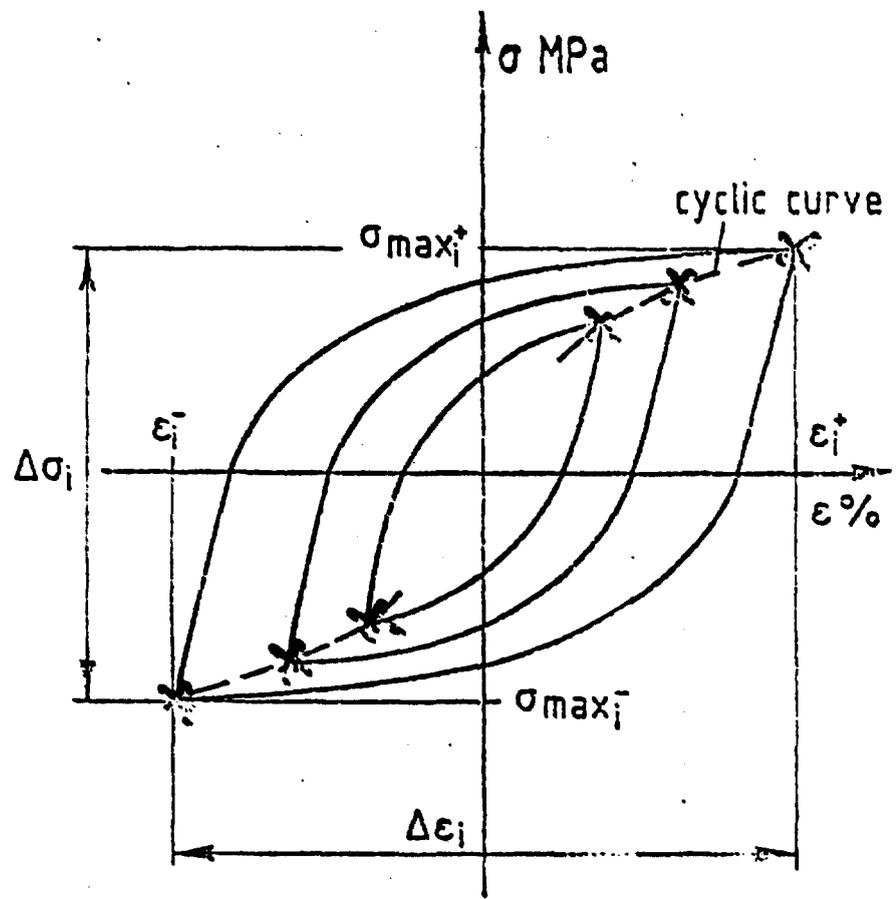
REFERENCES

- [1] RIVOLET J. C., MOULIN D.
"Ratchetting experiments on a cylindrical vessel with variable sodium level"
6th Int. Conf. on Structural Mechanics in Reactor Technology, Paris, France,
August 17-21, 1981, paper L. 10.6.

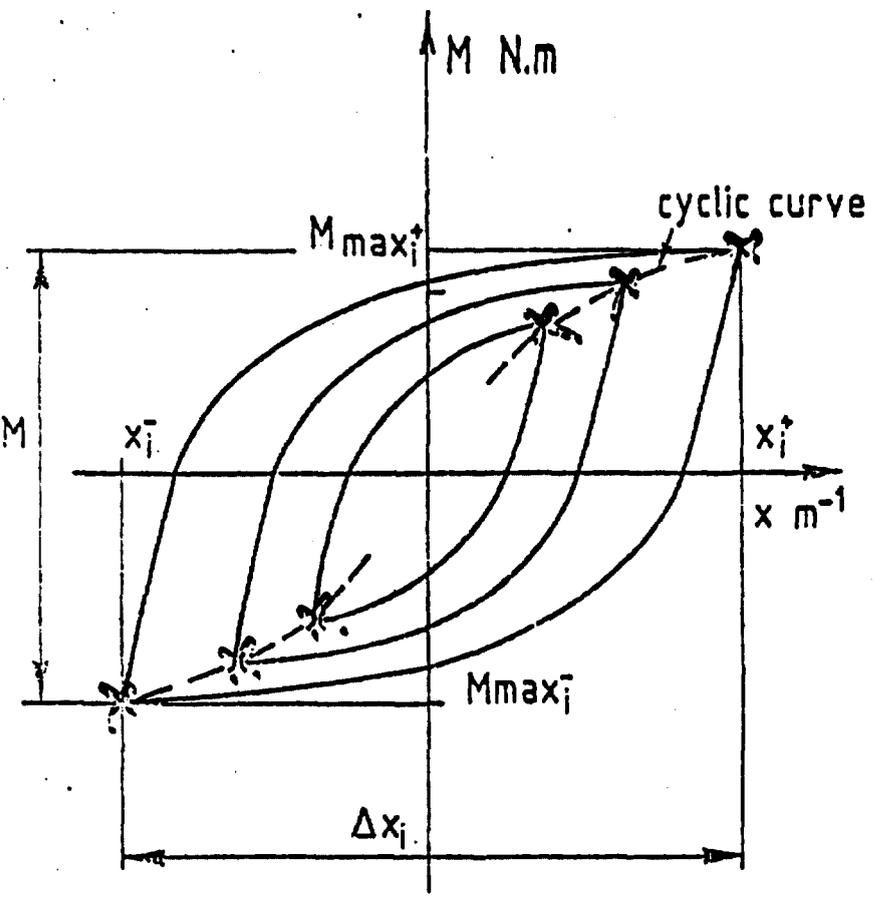
- [2] MASSONET C.
"Resistance des matériaux"
Dunod, Paris, 1965, Tome II.

LIST OF CAPTIONS

- Figure 1 : Experimental determination of σ - ϵ and M - χ cyclic curves. Cyclically stabilized loops at 3 levels of deformation.
- Figure 2 : Schematic presentation of test assembly and test specimen. Definition of the instrumentation.
- Figure 3 : Displacements and strength values recorded during tensile loading and elastic unloading.
- Figure 4 : Displacements and strength values recording during alternative cycling at one curvature variation imposed.
- Figure 5 : Pure flexion in a rectangular beam.
- Figure 6 : Experimental points (χ) of the ΔM - $\Delta \chi$ curve and adjusted $\Delta M = K\Delta \chi^n$ curve - E (Young modulus is extracted from tensile test). F is represented for verification of elastic behavior.
- Figure 7 : $\Delta \sigma$ - $\Delta \epsilon$ cyclic curve calculated from ΔM - $\Delta \chi$ fitted curve. E slope is represented for verification of elastic behavior.



1. a

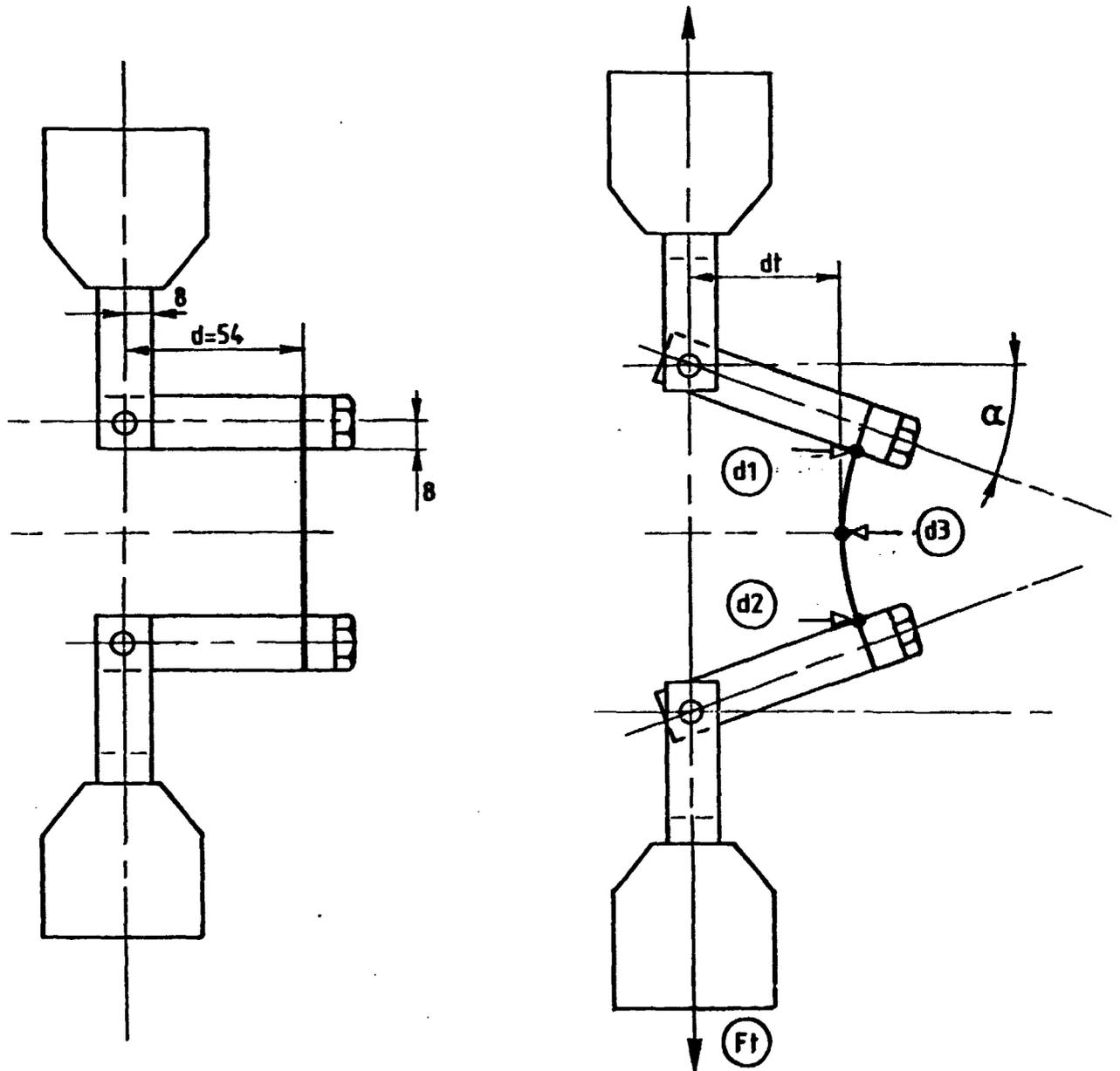


1. b

FIGURE 1

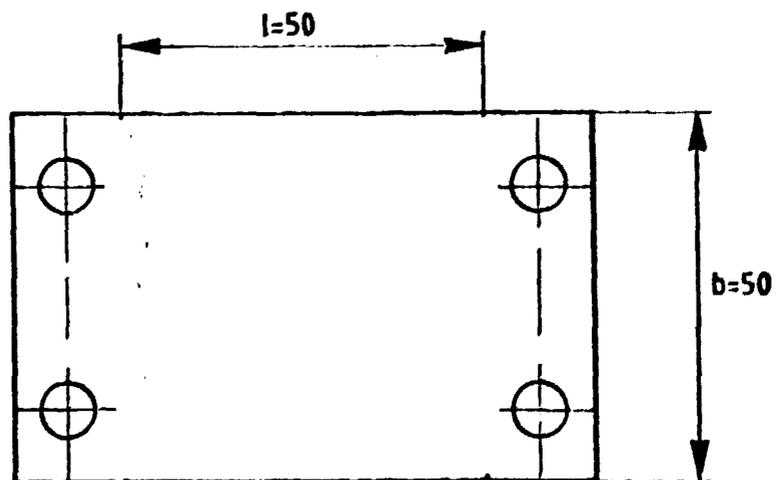
5 270001
01013 201011.0

FIGURE 2



Initial position

Intermediate position
(Values recorded)



$e=1.45$

Specimen geometry

FIGURE 3

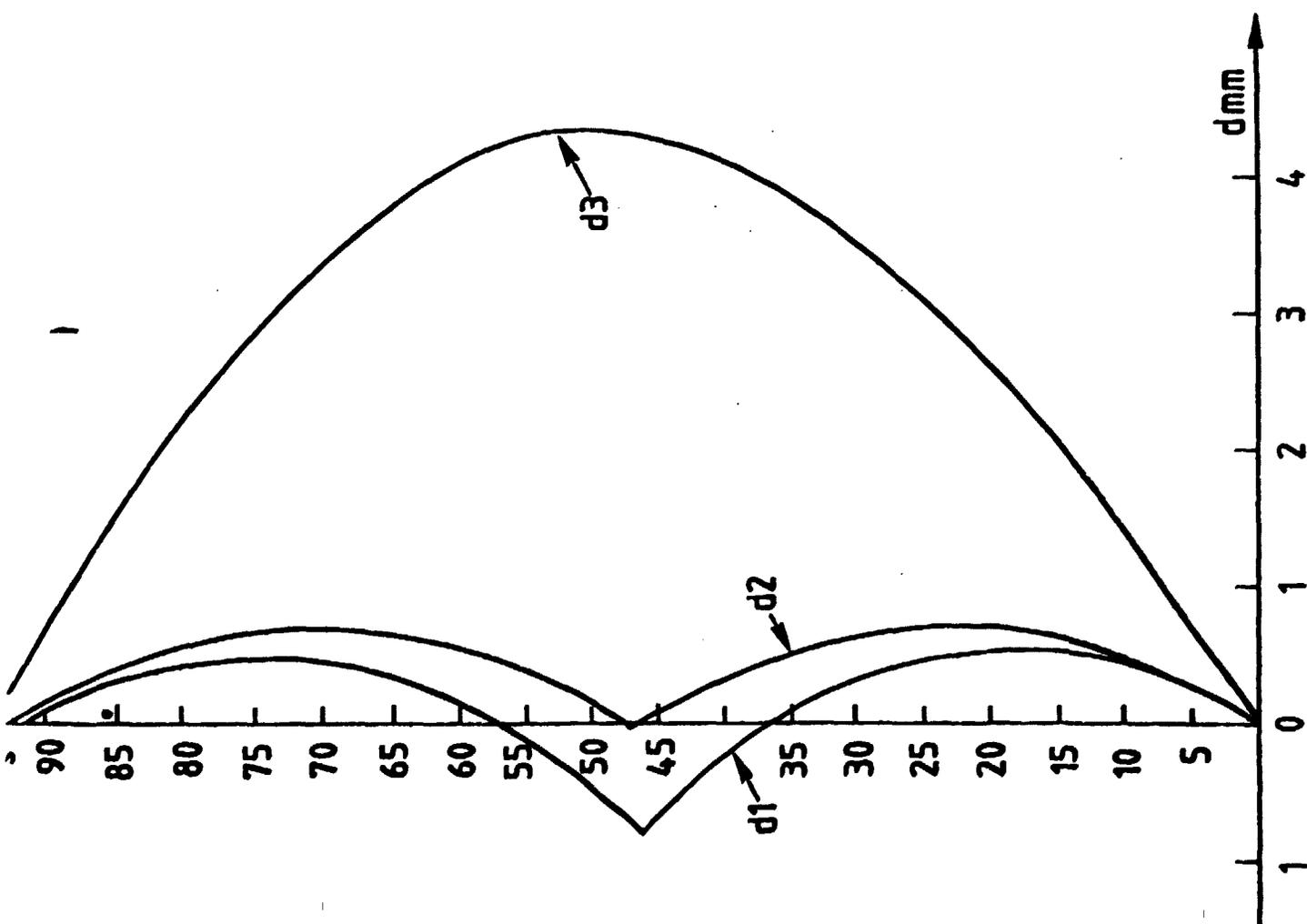
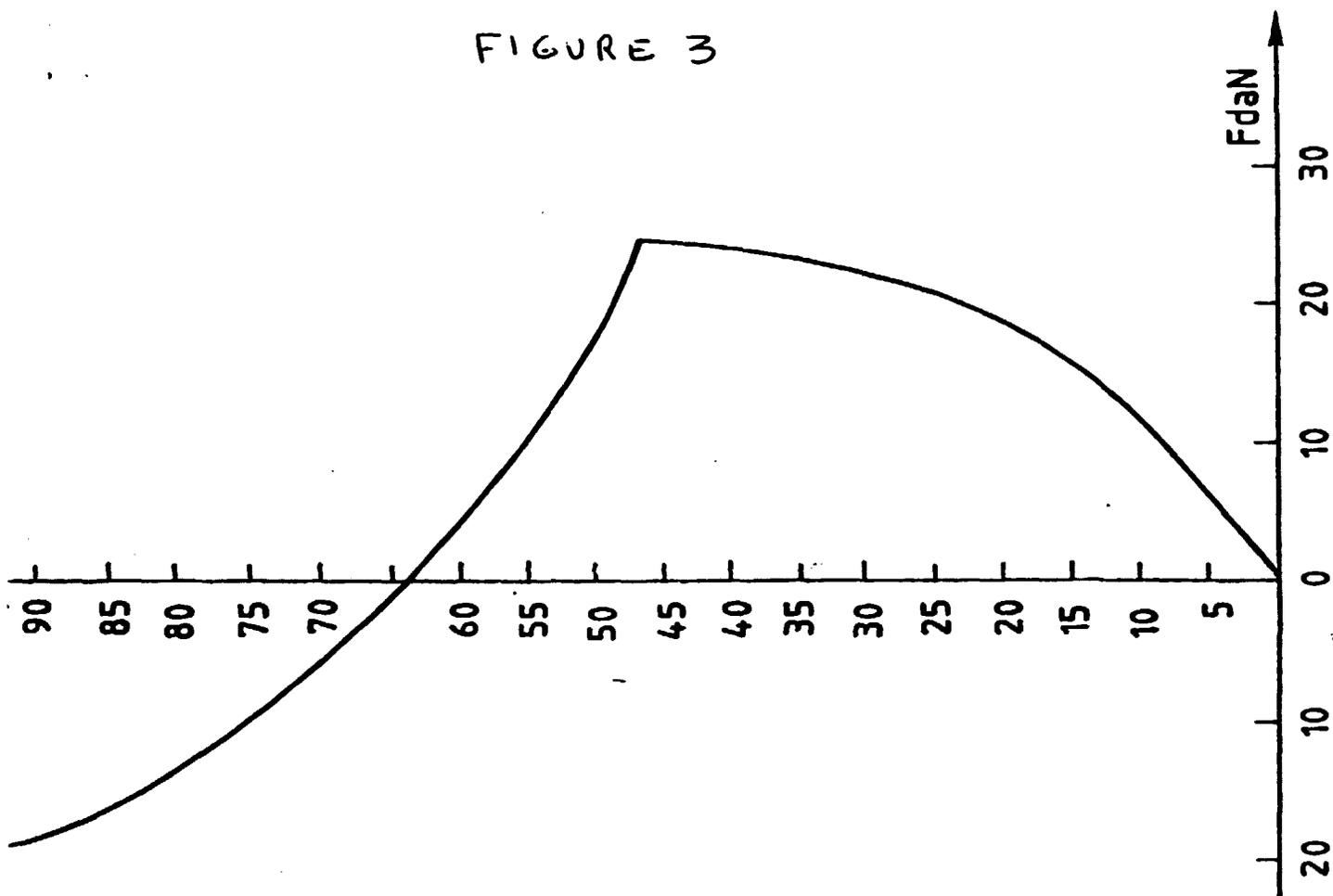
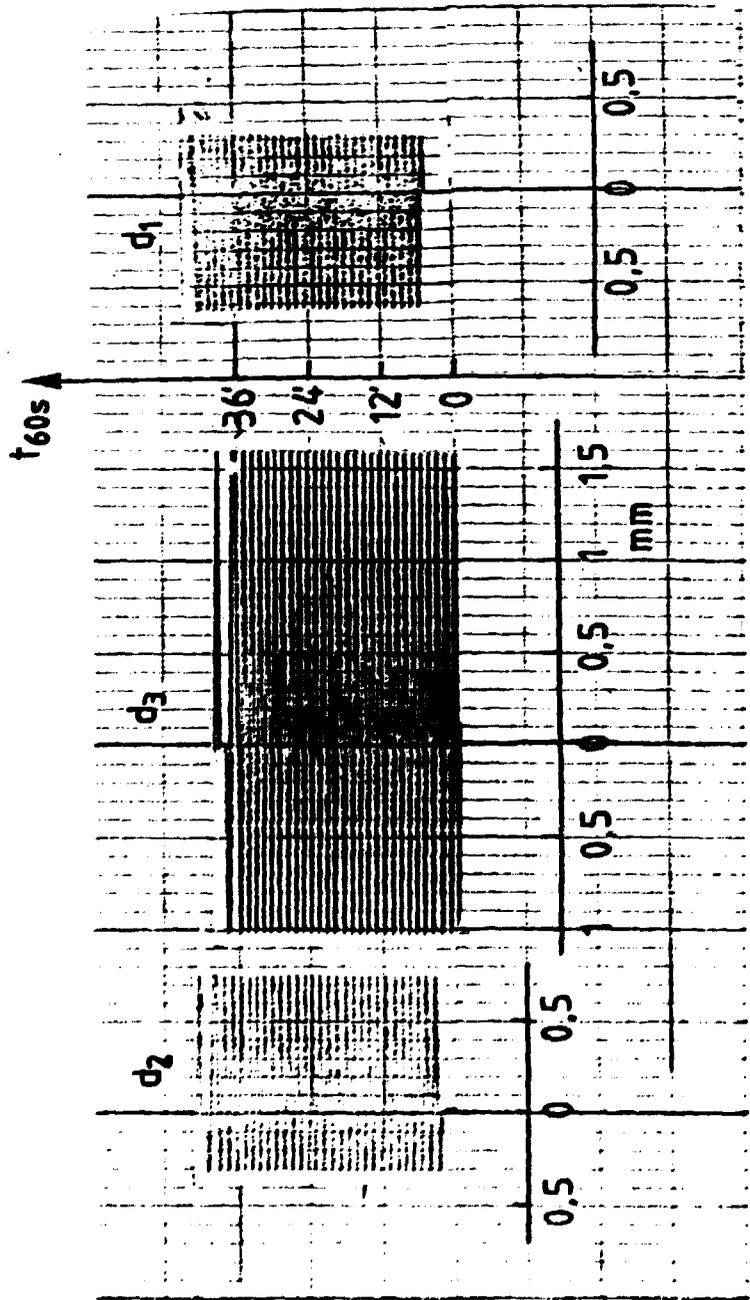
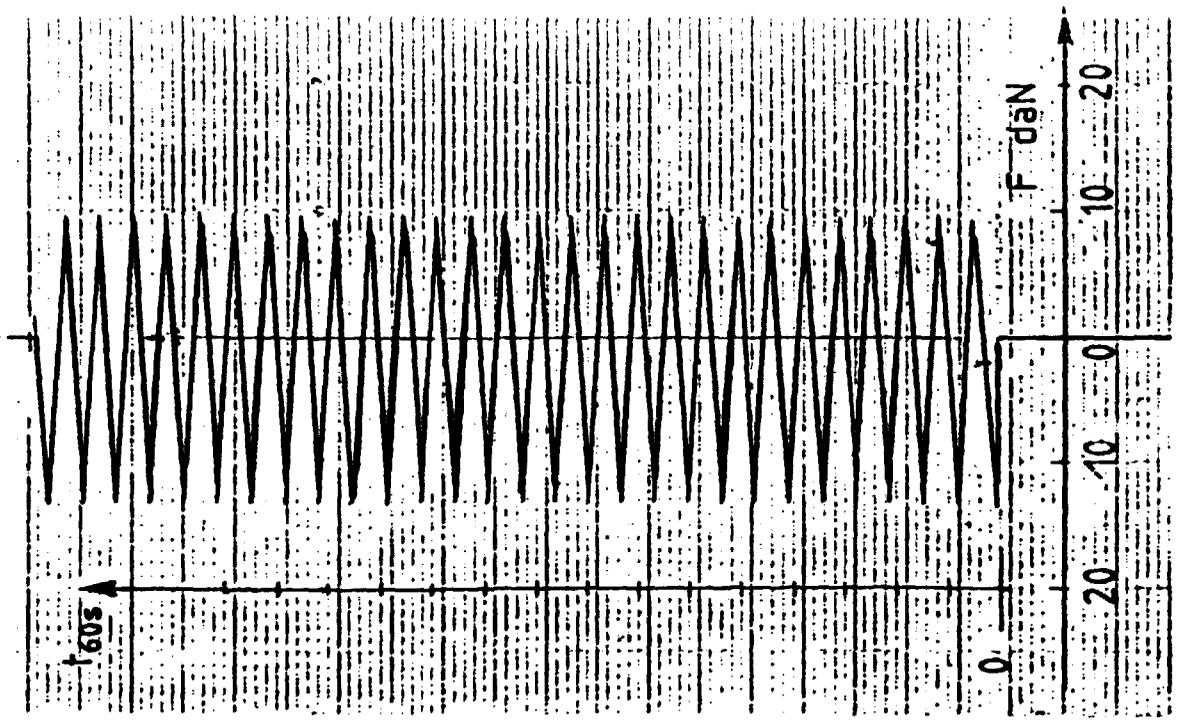


FIGURE 4

4a

4b



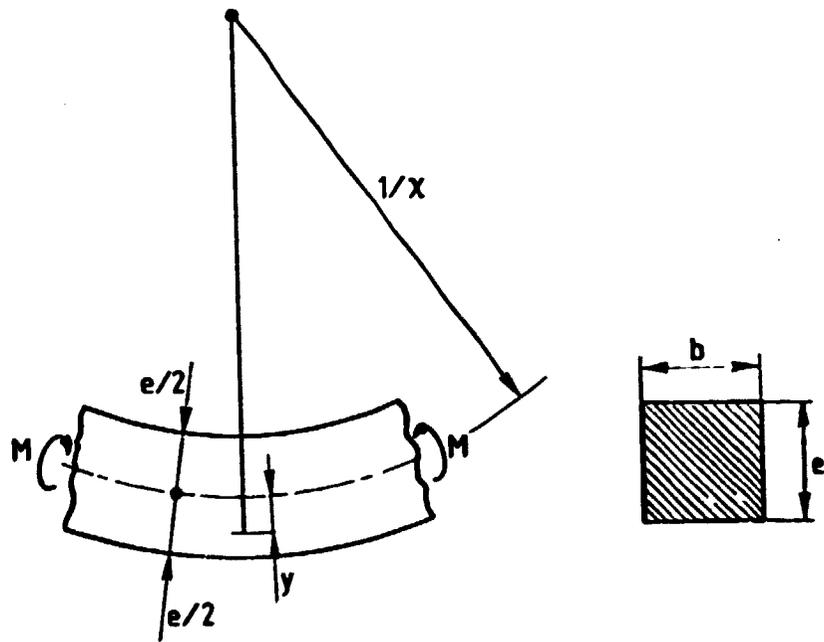


FIGURE 5

0.970 μ.1

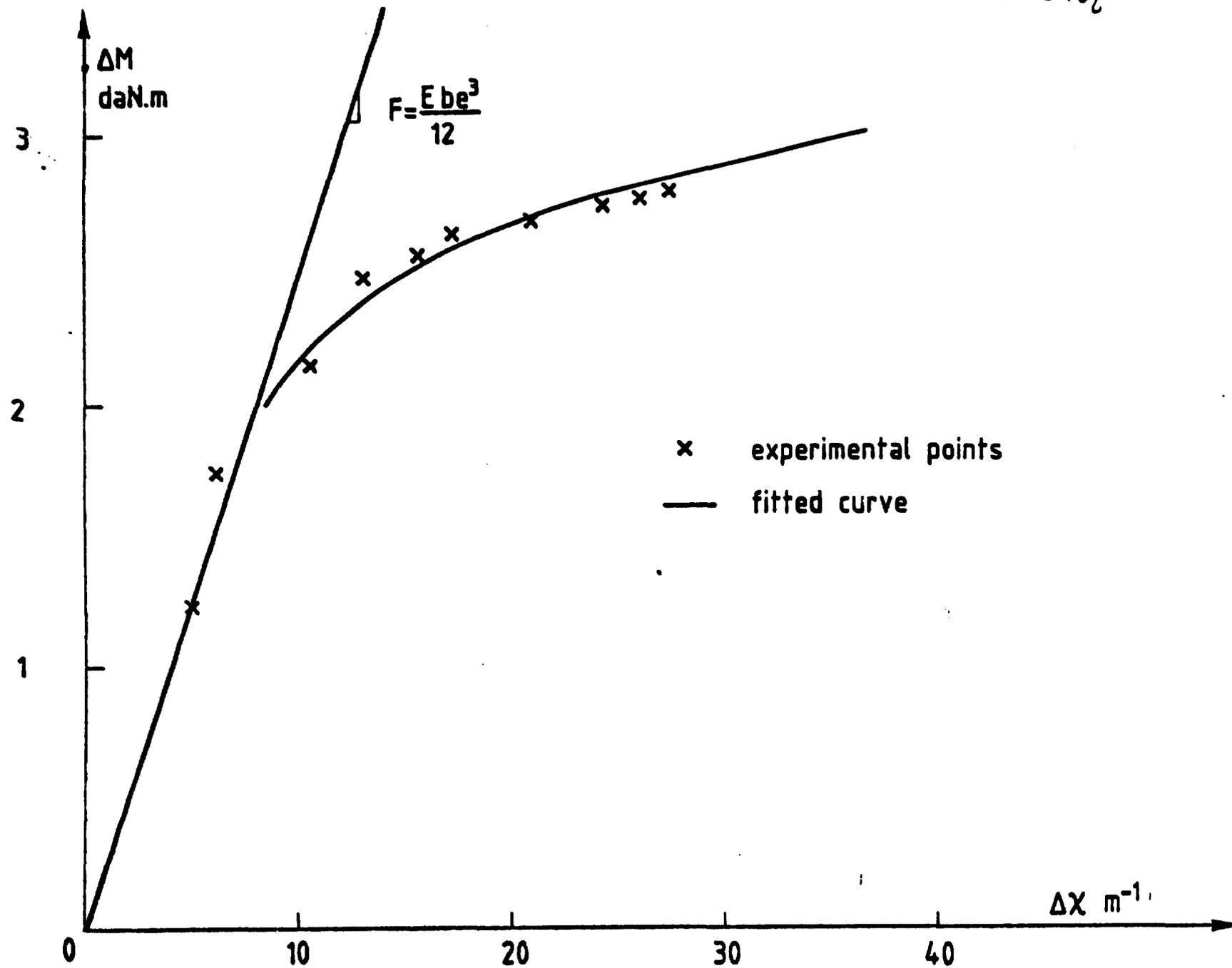
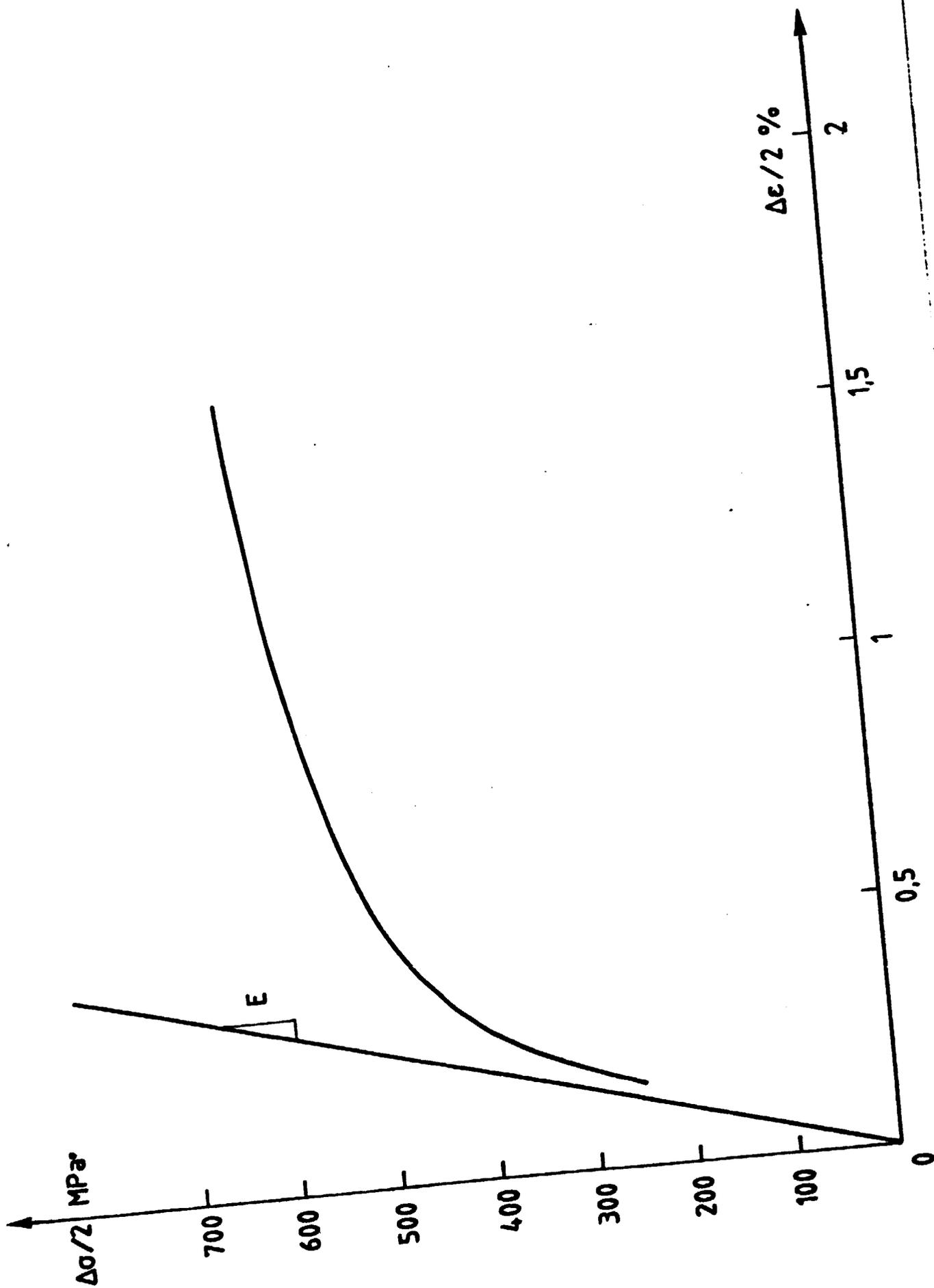


FIGURE 6

FIGURE 7



$\Delta \chi \text{ m}^{-1}$	N	$\Delta M \text{ daN.m}$	$\Delta \xi \%$
5,0	30	1,24	0,36
6,1	27	1,73	0,44
10	30	2,15	0,70
13	30	2,48	0,94
16	30	2,55	1,16
17	41	2,63	1,23
21	30	2,67	1,52
24	30	2,73	1,74
26	30	2,76	1,89
28	30	2,80	2,03

Table 1 : Experimental data