

INT 156/89

Décembre 1988

**DIMENSIONNEMENT DU
NOYAU CENTRAL
DE TCV**

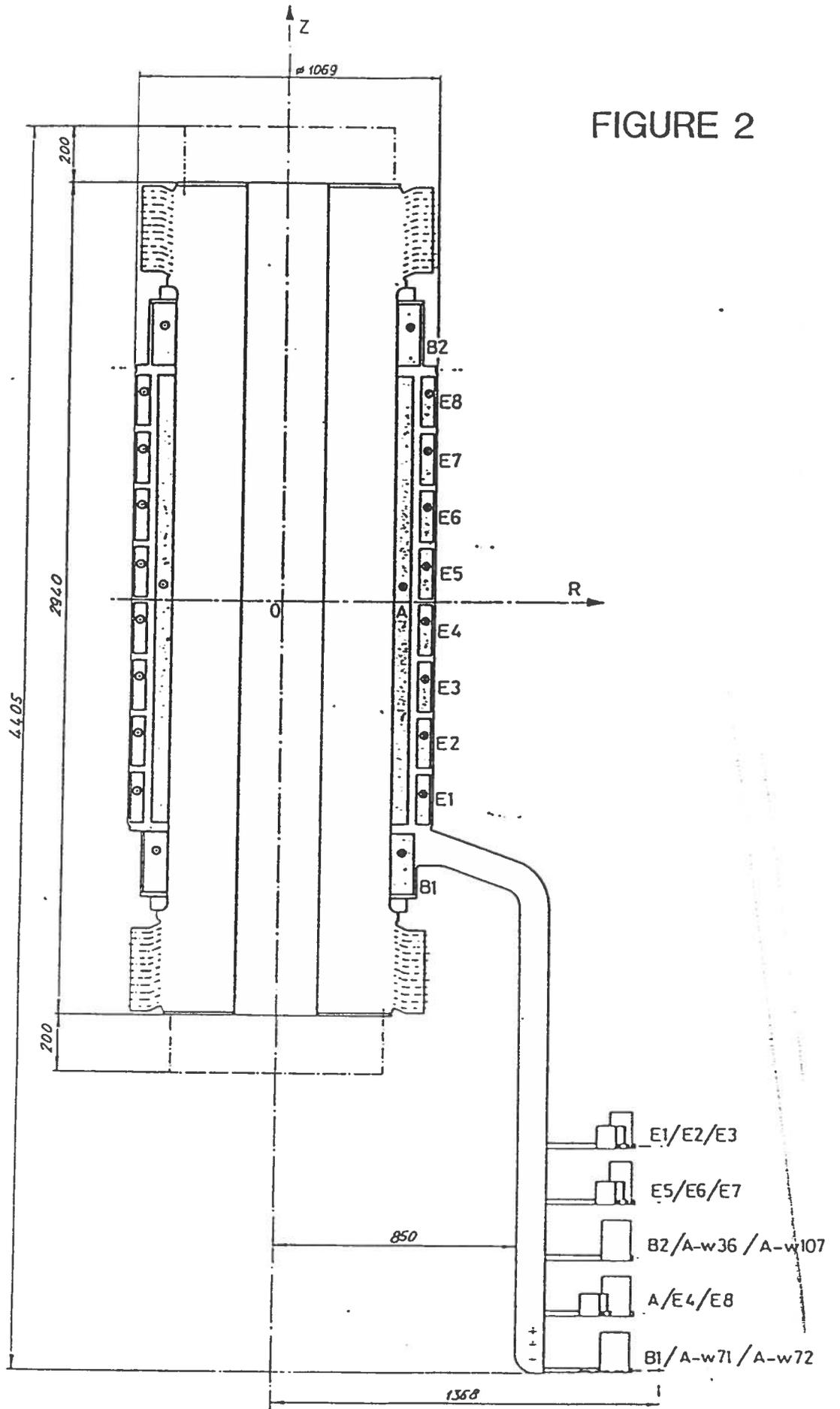
G.Tonetti

INTRODUCTION

Le courant (≤ 1.2 MA), la position et la forme du plasma dans le tokamak TCV sont déterminés par un ensemble de 23 bobines de champ poloidal (fig. 1) contrôlant environ 20 MJ d'énergie magnétique. La partie principale du tokamak TCV, le noyau central (fig.2), comprend la colonne intérieure de la bobine de champ toroidal sur laquelle sont enroulées les spires des bobines A, B1, B2 d'induction du courant plasma et des 8 bobines E1-E8 de façonnage de la forme du plasma. La configuration variable du plasma de TCV implique une grande variabilité des courants circulant dans les bobines. Il en résulte des conditions de charges thermiques et électriques très diverses avec des forces électromagnétiques considérables pouvant atteindre 100 à 200 tonnes sur certaines bobines.

Dans ce rapport, les dimensions, les caractéristiques physiques et les conditions de charge maximales sont données.

FIGURE 2



DIMENSIONNEMENT DU NOYAU CENTRAL DE TCV

Définition des termes du tableau

Dimension des bobines

R	:	rayon du centre de la bobine
Z	:	position verticale du centre
H	:	hauteur de la bobine
W	:	largeur "
N _s	:	nombre effectif de spires
N _l	:	nombre de couches

Dimensions du conducteur et de l'isolation

Ces valeurs sont données comme exemple, les dimensions finales du conducteur et de l'isolation sont à définir par le constructeur

h _c	:	hauteur du conducteur
w _c	:	largeur
Sh (d)	:	section (diamètre) du trou de refroidissement. La section du trou est donnée par les conditions définies dans les caractéristiques thermiques.
S _{cu}	:	section de cuivre
L _{cu}	:	longueur du conducteur (approximative)
M _{cu}	:	masse de cuivre
i _c	:	épaisseur d'isolant autour du conducteur
i _l	:	épaisseur d'isolant entre couches
C _r	:	coefficient de remplissage = S _{cu} /(H x W)
M _i	:	masse approximative d'isolant
V _{eau}	:	volume d'eau dans la bobine

Caractéristiques électriques

R _Ω	:	résistance électrique pour $r = 1.9 \cdot 10^{-8} \Omega \cdot m$
L	:	inductance
I _{max}	:	courant maximum

- U_{DCmax} : tension continue maximum
 U_{AC1} : tension efficace d'ondulation à U_{DC} max
 U_{AC2} : tension efficace d'ondulation à 0 U_{DC}
 f : fréquence de la tension d'ondulation
 U_{Tmax} : tension transitoire maximum. Cette tension est déterminée par les circuits de protection des alimentations.

Conditions de charge du noyau central: Toutes les bobines sont indépendantes et le noyau central doit pouvoir supporter n'importe quelle configuration de courants. La seule restriction est que le courant dans les bobines A, B (ainsi que C et D) est de même signe.

Caractéristiques thermiques

- T_{min} : température minimum de la bobine
 = température minimum de l'eau de refroidissement.
 T_{max} : température maximum de la bobine fixée par les propriétés de l'isolation
 ΔT_{max} : différence maximum de température dans la bobine fixée par le refroidissement
 ΔT_{bmax} : différence maximum de température entre bobines (voir remarque ci-dessous)
 $P_{\Omega max}$: puissance ohmique à I_{max}
 t_{pmax} : durée maximum d'un tir à I_{max}
 ΔE_{max} : énergie thermique maximum déposée dans la bobine par un tir à I_{max} = $(P_{\Omega max} \cdot t_{pmax})$
 t_{cmin} : durée minimum de refroidissement entre tir à I_{max}
 ΔT_{ad} : élévation adiabatique de température à P_{Wmax}
 ΔE_n : estimation de l'énergie déposée dans la bobine pendant un tir plasma
 ΔT_n : estimation de l'élévation de température pendant un tir plasma
 t_{pn} : durée normale d'activation de la bobine pendant un tir plasma

E_n , ΔT_n et t_{pn} ne sont donnés qu'à titre indicatif. Ils ne doivent pas être utilisés pour le dimensionnement des bobines.

l_c	:	longueur du canal de refroidissement
ϕ_{eau}	:	débit de l'eau de refroidissement
v_{eau}	:	vitesse de l'eau
Re	:	nombre de Reynolds
Δp	:	chute de pression dans la bobine (sans les amenées de courant ni les coudes)

Le refroidissement d'une bobine est déterminé par les conditions suivantes. L'eau de refroidissement circule avec un $\Delta T_{max} = T_{out} - T_{in}$ constant de 15° C (régulé par l'échangeur de chaleur); un Δp de 10 bars et un débit tel que la puissance de refroidissement multipliée par le temps t_{cmin} d'un cycle (énergie de refroidissement) est égale à l'énergie ΔE_{max} déposée dans la bobine. Ces conditions fixent le diamètre minimum du trou de circulation d'eau dans le conducteur et limitent la différence de température dans la bobine à ΔT_{max} . Le diamètre du trou de refroidissement s'obtient par itération de la formule suivante :

$$d^5 = \frac{32 \cdot \lambda(Re) \cdot r_{es}^2 \cdot l_c^3 \cdot I_{max}^4 \cdot \alpha^2}{\pi^2 \cdot C_w^2 \cdot \rho_w \cdot \Delta T_{max}^2 \cdot \Delta p} \cdot \frac{1}{S_{cu}^2}$$

en commençant avec : $S_{cu}^{(0)} = h_c \times w_c \rightarrow d^{(0)}$

et continuant avec : $S_{cu}^{(n)} = S_{cu}^{(n-1)} - S_h^{(n-1)} \rightarrow d^{(n)} ; S_h = \pi d^2/4$

Les termes composant ces formules sont définis aux pages 1 à 3 et 8 avec $\alpha = t_{p_{max}}/t_{p_{min}}$. Voir également l'annexe concernant le refroidissement.

L'ensemble des bobines A-B-E du noyau central seront refroidies en parallèle avec les conditions définies ci-dessus fixées par la bobine la plus chaude. De cette façon, les bobines plus froides seront moins refroidies ou même réchauffées par la circulation de l'eau, ce qui minimisera les différences de température entre bobines.

Table 1 : Caractéristiques des bobines du noyau central

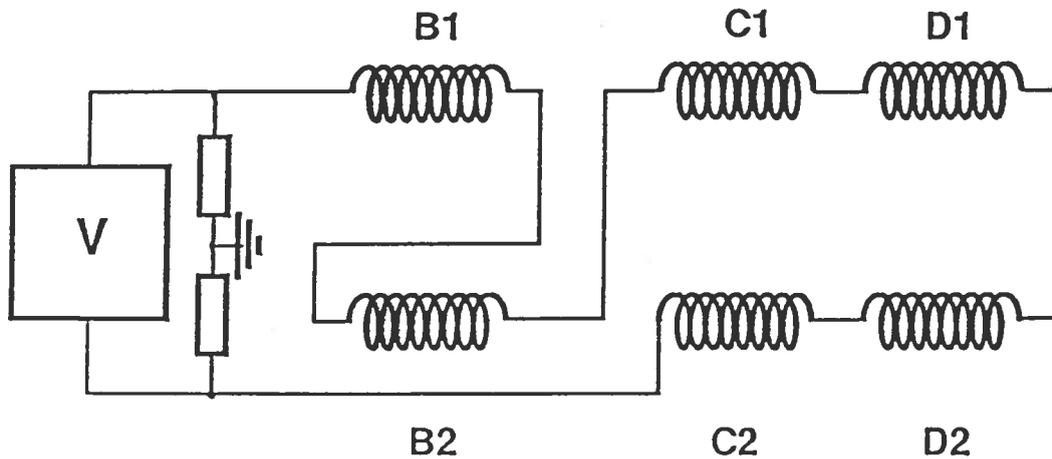
		A	B1 - B 2	E 1 - E 8
R	[m]	0.422	0.4375	0.505
Z	[m]	0	± 0.932	± 0.1,0.3,0.5,0.7
H	[m]	1.584	0.216	0.18
W	[m]	0.061	0.092	0.051
N _s	-	143	29	34
N _l	-	2	4	3
h _c	[mm]	19.8	25	13
w _c	[mm]	28.5	21	15
S _h	[mm ²]	73.7 (Ø9.7)	63.0 (Ø 9)	27.9 (Ø 6)
S _{cu}	[mm ²]	490.6	462	167.1
L _{cu}	[m]	379	80	108
M _{cu}	[kg]	1661	330	161
i _c	[mm]	1	1	1
i _l	[mm]	0	0	0
C _r	-	0.726	0.674	0.619
M _i	[kg]	85	26	17
V _{eau}	[litr]	28	5	3
R _Ω	[mΩ]	14.7	3.3	12.3
L	[mH]	7	0.91	1.75
I _{max}	[kA]	± 26	± 26	± 7.5
U _{DCmax}	[V]	± 1400	± 1400 *	± 620
U _{AC1}	[V]	35	35 *	16
U _{AC2}	[V]	260	260 *	115
f	[Hz]	1150-1440	1150-1440	1150-1440
U _{Tmax}	[V]	± 3000	± 3000 *	± 1300
T _{min}	[°C]	T ambiante	T ambiante	T ambiante
T _{max}	[°C]	70	70	70
ΔT _{max}	[°C]	15	15	15
ΔT _{bmax}	[°C]	40	40	40
P _{Ωmax}	[MW]	9.93	2.22	0.69
t _{pmax}	[S]	1.5	1.5	1.5
ΔE _{max}	[MJ]	14.89	3.33	1.04
t _{cmin}	[S]	300	300	300

ΔT_{ad}	[°C/S]	15.5	17.5	11.1
ΔE_n	[MJ]	6.2	1.4	0.6
ΔT_n	[°C]	10	11	9
t_{pn}	[S]	2	2	2
$n_c \times l_c$	[m]	4 x 94.8	1 x 80	1 x 108
ϕ_{eau}	[l/s]	0.79 (4 x 0.198)	0.177	0.055
v_{eau}	[m/s]	2.68	2.81	1.97
Re	-	52000	50500	23500
Δp	[bar]	10	10	10

* Les tensions indiquées s'appliquent aux 6 bobines B1- B2 , C1- C2 , D1 - D2 , alimentées en série. Voir page suivante.

Alimentation électrique des bobines B - C - D

Les 6 bobines sont connectées électriquement en série (refroidissement à l'eau en parallèle). Le potentiel de terre est fixé par un pont résistif.



Tension continue maximum	± 1400 V
Tension efficace d'ondulation (à UDC max)	35 V
Tension efficace d'ondulation (à UDC = 0 V)	260 V
fréquence d'ondulation	1150 - 1440 Hz
Tension transitoire maximum	± 3000 V
Durée d'activation à I_{max}	1.5 S

Différence de tension maximum entre bobines

Le point milieu des bobines est au potentiel de terre. Si le potentiel est fixé à l'une des extrémités des bobines, les tensions maximum sont doublées. En cas de défaut de terre, la tension doublée (indiquée entre parenthèses) peut apparaître transitoirement entre les bobines avant que les circuits de protection ne coupent les alimentations. Il est donc nécessaire que l'isolation puisse supporter la tension doublée pour une durée de environ 1 seconde.

UDC = tension continue, UT = tension transitoire,

TF = bobine du champ toroidal

	UDC	UT
A - B	1500 (3000)	3000 (6000)
A - E, B - E	1075 (2150)	2150 (4300)
TF - A, TF - B	1075 (2150)	2150 (4300)

Expansion thermique

Expansion du noyau central pour $\Delta T = 40^{\circ} C$

Diamètre	ΔD	\equiv	0.75 mm
Hauteur	Δh	\equiv	1.12 mm

PARAMETRES PHYSIQUES UTILISES POUR LE DIMENSIONNEMENT

<u>Cuivre</u>	99.9 % Cu	0.1 % Ag		
Résistivité	20° C		r_{es}	$1.7 \cdot 10^{-8} \quad \Omega m$
	50° C		r_{es}	$1.9 \cdot 10^{-8} \quad \Omega m$
Masse spécifique			ρ_{cu}	$8.93 \cdot 10^3 \quad kg/m^3$
Capacité calorifique spécifique			C_{cu}	$3.85 \cdot 10^2 \quad J/kg^{\circ}K$
Conductivité thermique			γ_{cu}	$3.7 \cdot 10^2 \quad W/m^{\circ}K$
Coefficient de dilatation thermique			α_{cu}	$1.77 \cdot 10^{-5} \quad \circ K^{-1}$
Module d'élasticité			γ_{cu}	$1.2 \cdot 10^{11} \quad Pa$
Module de cisaillement			G_{cu}	$4.6 \cdot 10^{10} \quad Pa$
Limite d'élasticité	0.2%		σ_{cu}	$2.4 \cdot 10^8 \quad Pa$
Limite de fatigue	$3 \cdot 10^5$ cycles		σ_{cu}	$1.2 \cdot 10^8 \quad Pa$

Isolant epoxy-fibre de verre

Masse spécifique		ρ_e	$1.8 - 2 \cdot 10^3$	kg/m^3
Module d'élasticité //⊥		γ_e	26-30/13	GPa
Module de cisaillement //⊥		G_e	13/4.2-4.5	GPa
Résistance à la traction //⊥		σ_e	$> 3.5/1.0 \cdot 10^8$	Pa
Coefficient de dilatation thermique //⊥		α_e	$1.5/4.4 \cdot 10^{-5}$	$\circ K^{-1}$
Conductivité thermique		γ_e	$4 - 4.5 \cdot 10^{-1}$	$W/m^{\circ}K$
Température maximum admissible			150	$\circ C$

Interface Cu - isolant

Résistance à la traction			$5 - 6 \cdot 10^7$	Pa
Résistance au cisaillement			$4 - 5 \cdot 10^7$	Pa

Eau de refroidissement

Masse spécifique		ρ_w	10^3	kg/m^3
Capacité calorifique spécifique		C_w	$4.185 \cdot 10^3$	$J/kg^{\circ}K$
Viscosité cinématique 20°		ν	$1 \cdot 10^{-6}$	m^2/S
Viscosité cinématique 50°		ν	$0.5 \cdot 10^{-6}$	m^2/S
Coefficient de friction ($Re > 10^4$)		$\lambda(Re)$	$7.1 \cdot 10^{-3}$	-

pour le trou de refroidissement des conducteurs de cuivre des bobines ,
valeur obtenue d'après les bobines du TCA.

FORCES AXIALES ET RADIALES DANS LE NOYAU CENTRAL

Les forces axiales, F_z , et les forces de traction, $F_T = F_R / 2\pi$ résultantes de la force radiale, sont données dans le tableau n° 3 pour différents cas de charges définis dans le tableau n° 2. Les cas de charges 4 et 7b sont donnés seulement pour indication car ils sont exclus.

Les forces sont les forces totales agissant sur les bobines. Les forces sur chaque spire sont données pour le cas de charge 1 sous forme de graphiques. Pour les autres cas de charges, les forces sur chaque spire sont disponibles. Il faut cependant remarquer que pour le calcul des forces, les sections des bobines ne sont pas divisées en spires de la même façon que les bobines réelles. En particulier, B est divisé en 3 couches au lieu de 4. Il faut donc renormaliser ces forces par rapport à la section des conducteurs. Le calcul de la force totale agissant sur la bobine n'est cependant pas modifié par ce problème.

Les cas de charge sont toujours pour les courants maxima dans les bobines. Les autres bobines, C, D et F, sont également incluses dans le calcul des forces.

Les forces verticales, F_z , sont indiquées avec des signes relatifs. F_z peut être inversé en inversant les courants. Les forces maxima sont soulignées. Les cas 7, 8, 9 et 10 correspondent à des configurations de courant optimisées pour la force maximum sur les bobines E. Les autres forces ne sont pas indiquées, elles sont inférieures à la force maximum soulignée.

Les forces de traction, F_T , sont maximales pour le cas de charge 1 et sont données dans la dernière colonne du tableau. La force maximale sur une spire est également indiquée à la suite du tableau.

La somme des forces sur les groupes de bobines est donnée dans le tableau n° 4.

Table 2 : Cas de charge

	A	B	C	D	E1	E2	E3	E4	E5	E6	E7	E8	F1	F2	F3	F4	F5	F6	F7	F8	Remarques
1	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	FT max.
2	+	+	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	Fz max. sur A
2b	+	0	-	-	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	
3	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	
3b	+	0	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	Fz max. sur ABE
4	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	Fz max. sur B.
5	+	+	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	
6	+	0	-	-	-	-	-	-	+	+	+	+	0	0	0	0	0	0	0	0	
7	+	0	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	Fz max. sur E1 - E8
7b	+	-	+	+	+	+	+	+	+	+	+	+	-	+	+	+	+	+	+	+	Fz max. sur E1 - E8
8	+	0	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	+	+	+	+	+	+	Fz max. sur E2 - E7
9	+	0	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	+	+	+	+	+	Fz max. sur E3 - E6
10	+	0	-	-	+	+	+	+	+	+	+	+	-	-	-	-	+	+	+	+	Fz max. sur E4 - E5

Table 3 : Forces en [MN]

Fz	1	2	2b	3	3b	4	5	6	7	7b	8	9	10	F _T
A	0	<u>2.44</u>	2.44	0.702	0.702	0	0	1.74						5.65
B1	<u>2.00</u>	0.257	0	1.73	0	-2.69	0.422	0						0.82
B2	<u>-2.00</u>	-1.71	0	-1.82	0	2.69	-0.422	0						0.82
E1	0.454	0.306	-0.222	0.377	0.904	1.51	0.31	-0.210	<u>0.99</u>	1.52				0.156
E2	0.222	-0.0555	-0.278	0.209	0.432	0.668	0.0772	-0.224		<u>0.94</u>				0.174
E3	0.109	-0.316	-0.415	0.163	0.261	0.307	0.0238	-0.320						0.186
E4	0.033	-0.822	-0.851	0.140	0.168	0.09	0.0052	-0.730					<u>0.89</u>	0.192
E5	-0.033	0.822	0.793	0.101	0.073	-0.09	-0.0052	0.673					<u>0.85</u>	0.192
E6	-0.109	0.313	0.214	0.0267	-0.072	-0.307	-0.0238	0.120						0.186
E7	-0.222	0.0453	-0.178	-0.101	-0.324	-0.668	-0.0772	-0.231						0.174
E8	-0.454	-0.271	-0.799	-0.353	-0.881	-1.51	-0.31	-0.811						0.156

Force de traction F_T maximale sur une spire

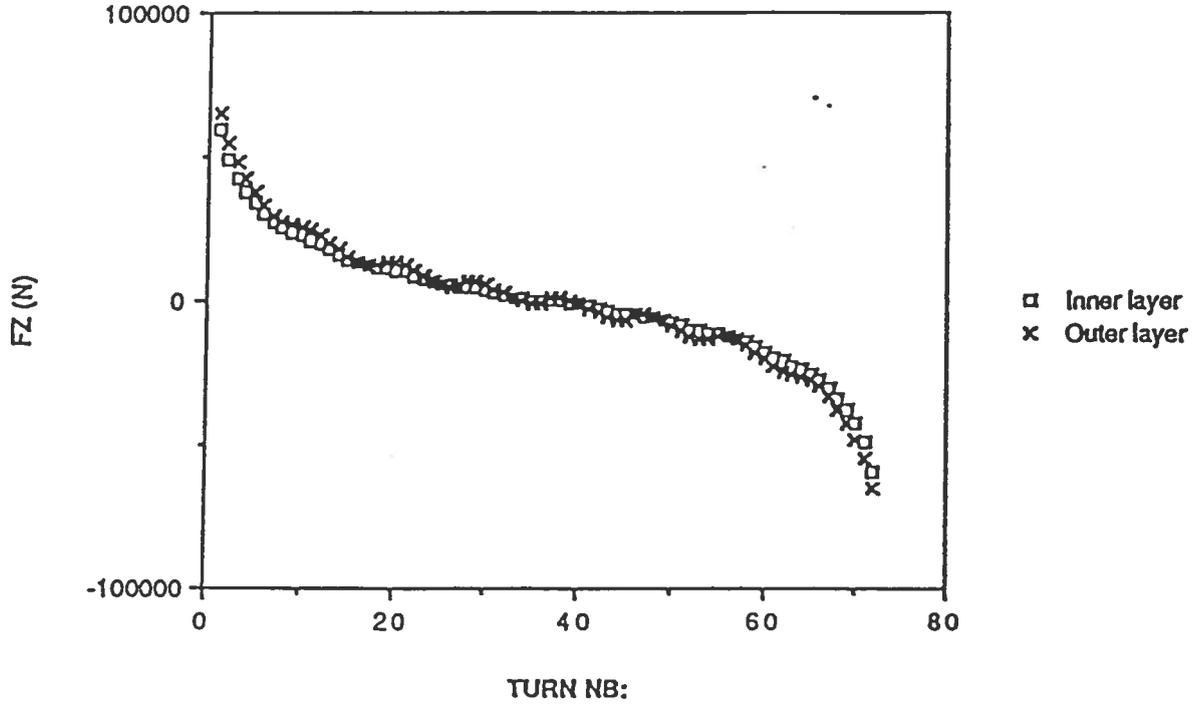
A : F _{Tmax}	=	4.79 10 ⁴ N	→	σ _{max}	=	9.76 kg/mm ²
B : F _{Tmax}	=	4.04 10 ⁴ N	→	σ _{max}	=	8.93 kg/mm ²
E : F _{imax}	=	7.26 10 ³ N	→	σ _{max}	=	4.33 kg/mm ²

Table 4 : Forces combinées en [MN]

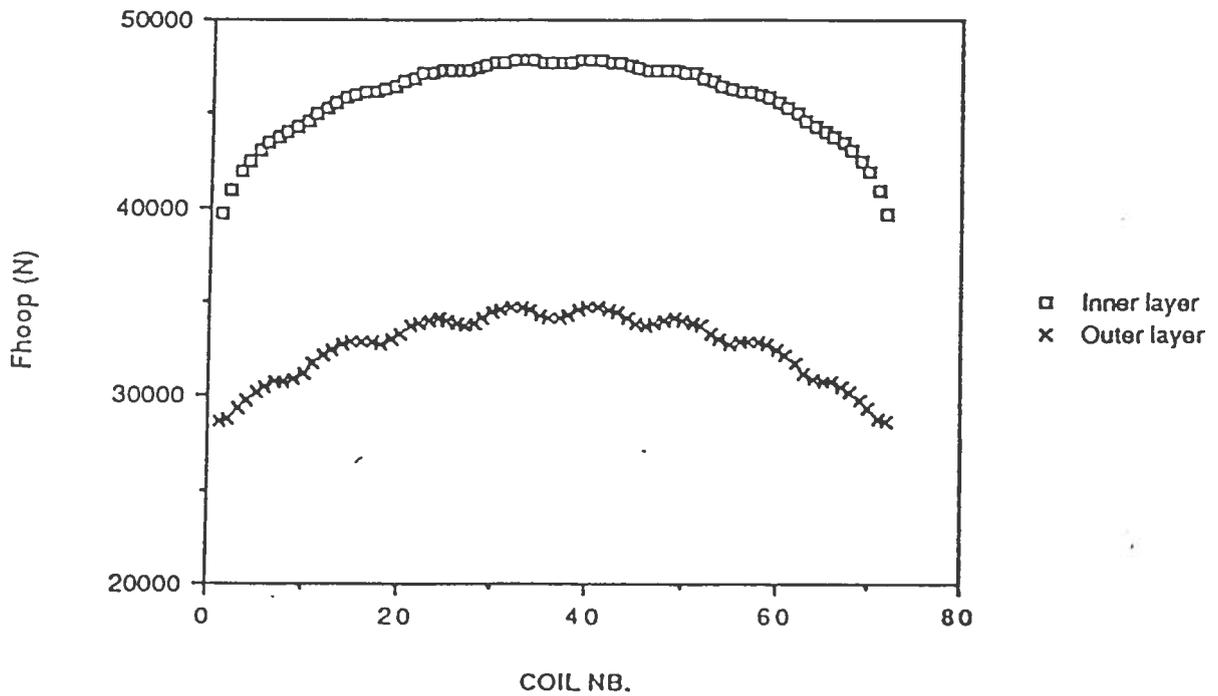
	1	2	2 b	3	3 b	4	6
AI	1.21					3.89	
Au	-1.21					-3.89	
ABE	0	1.00	0.762	1.17	1.26	0	0
ABEI	4.02					3.77	
ABEu	-4.02					-3.77	
E	0	0.021	-1.735	0.562	0.562	0	1.74
EI	0.819					2.57	
Eu	-0.819					-2.57	
AEI	2.03					6.46	
AEu	-2.03					-6.46	

ABE : Σ forces A+B+E
 E : Σ forces E1+...+E8
 AE : Σ forces A + E
 I/u : moitié inférieure/supérieure

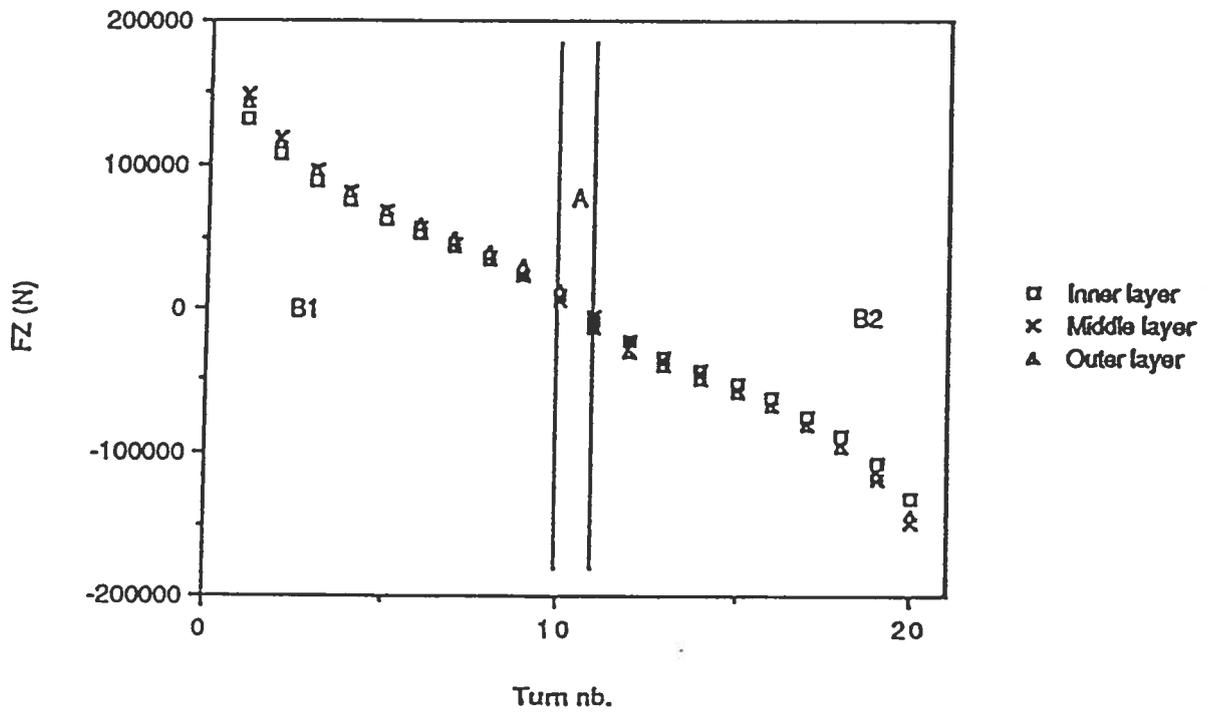
AXIAL FORCE ON COIL A



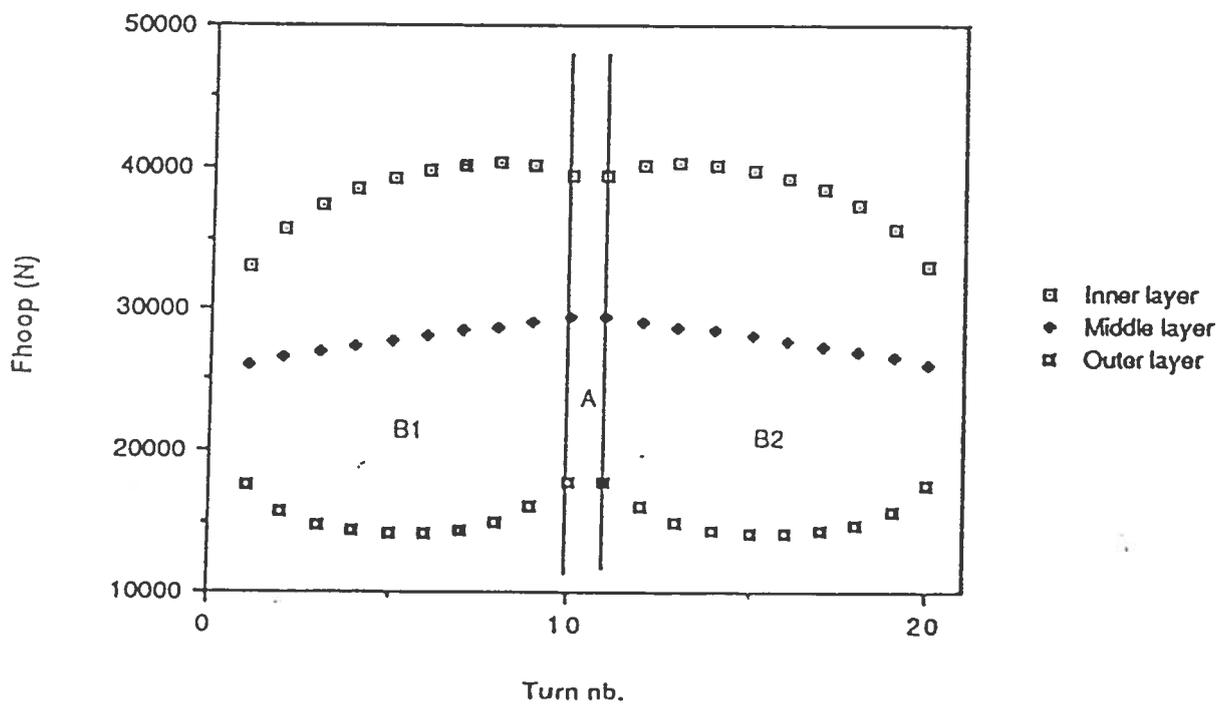
HOOP FORCE ON COIL A



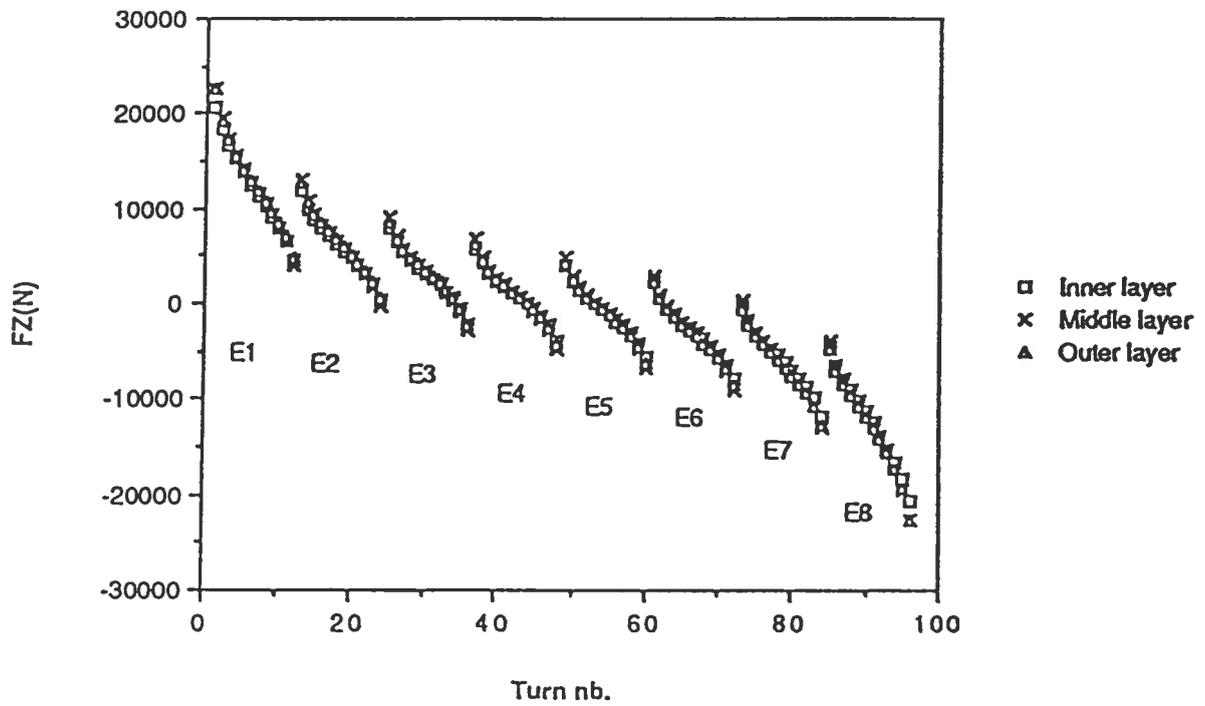
AXIAL FORCE ON COILS B1-B2



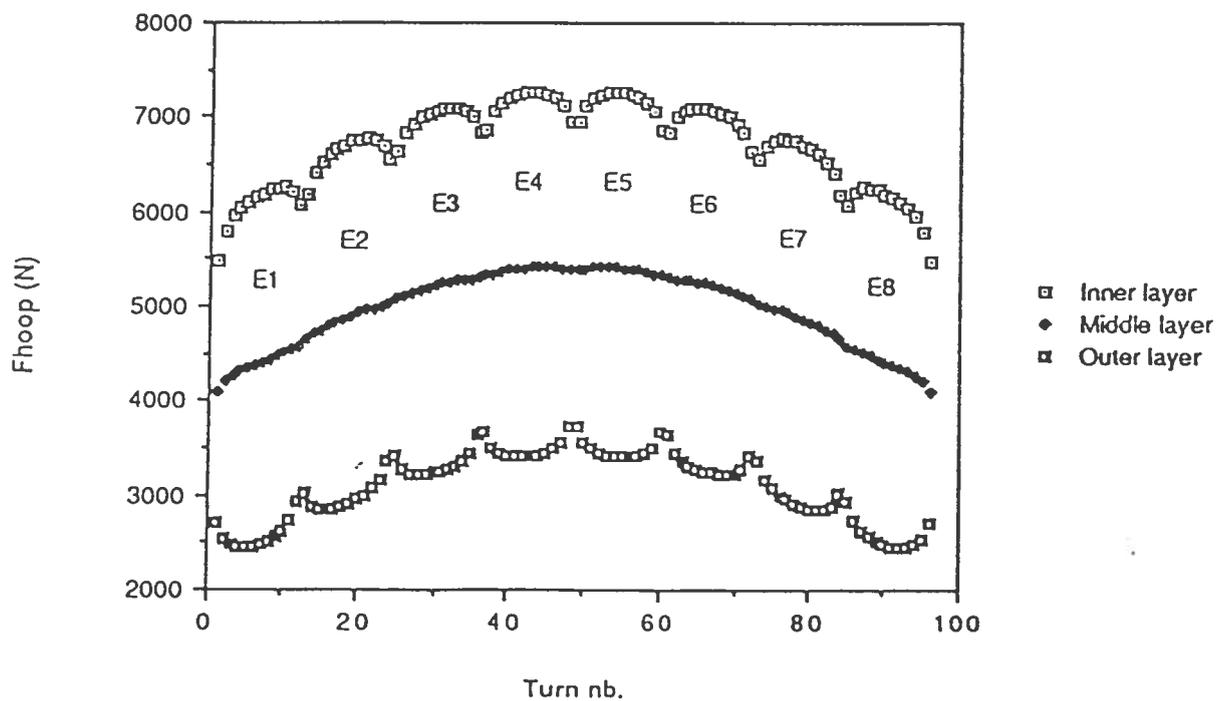
HOOP FORCE ON COILS B1-B2



AXIAL FORCE ON COILS E1-E8



HOOP FORCE ON COILS E1-E8



ANNEX TO INT. 156/89Determination of the cooling parameters of the coils.

All the parameters are as defined in int.156/89.

Reference : Heat, Mass, and Momentum Transfer
Warren, Rohsenow, Choi Prentice-Hall edition

Pressure drop

$$\Delta p = 4 \cdot \lambda(\text{Re}) \cdot \rho_w \cdot \frac{v_{\text{eau}}^2}{2} \cdot \frac{l_c}{d} \quad 1)$$

$$v_{\text{eau}} = \phi_{\text{eau}} / (n \cdot S_h) \quad 2)$$

$$d = 4 \cdot S_h / P_h \quad \text{is the hydraulic diameter, } P_h \text{ being the hole perimeter}$$

$$l_c = L_{\text{cu}} / n \quad n \text{ being the number of cooling channels}$$

$\lambda(\text{Re})$ is the friction factor obtained from the attached graphic

$$\text{Re} = v_{\text{eau}} \cdot d / \nu \quad 3)$$

ν is the kinematic viscosity of water

For an helical coil of radius R the friction factor λ is modified as follow

$$\lambda(\text{Re}) = \lambda_{\text{helical}} = \lambda_{\text{straight}} \cdot \left(\text{Re} \cdot \left(\frac{d}{2R} \right)^2 \right)^{0.05} \quad 4)$$

Energy balance

$$\phi_{\text{eau}} \cdot C_w \cdot \rho_w \cdot \Delta T_{\text{max}} \cdot t_{\text{cmin}} = \Delta E_{\text{max}}$$

$$\Delta E_{\text{max}} = R_{\Omega} \cdot I_{\text{max}}^2 \cdot t_{\text{pmax}} \quad 5)$$

$$R_{\Omega} = r_{\text{es}} \cdot L_{\text{cu}} / S_{\text{cu}} \quad ; \quad S_{\text{cu}} = h_c \cdot w_c - S_h$$

$$\alpha = t_{\text{pmax}} / t_{\text{cmin}}$$

Cooling conditions.

The cooling system is set such that ΔT_{\max} , the difference in water temperature between the coil input and output, is constant and the water flow is such as to remove all the energy ΔE_{\max} from the coil during the cooling cycle of time length t_{\min} .

Cooling hole formula

Combining the relations 1) 2) and 5) gives :

$$d^5 = \frac{32}{\pi^2} \cdot \frac{\lambda(\text{Re}) \cdot r_{es}^2 \cdot l_c^3 \cdot l_{\max}^4 \cdot (t_{p_{\max}} / t_{c_{\min}})^2}{C_w^2 \cdot \rho_w \cdot \Delta T_{\max}^2 \cdot \Delta p \cdot S_{cu}^2} \quad 6)$$

This formula has to be iterated with :

$$S_{cu}^{(0)} = h_c \cdot w_c \rightarrow d^{(0)}$$

$$S_{cu}^{(n)} = h_c \cdot w_c - \frac{\pi \cdot d^{2(n-1)}}{4} \rightarrow d^{(n)}$$

To use this formula it is necessary to know the value of $\lambda(\text{Re})$. If it is not the case, the formula has also to be iterated for λ . Another possibility is to use one of the fit shown in the graph such as :

$$\lambda(\text{Re}) = 0.046 / (\text{Re})^{0.2} \quad 7)$$

(which should be valid in the domain $20000 < \text{Re} < 100000$ for the kind of pipe used) together with the relations 3) and 4). This gives another formula for d :

$$d^{4.75} = 0.14384 \cdot \frac{v^{0.15} \cdot l_c^{2.85}}{\rho_w^{0.85} \cdot (2R)^{0.1} \cdot \Delta p} \cdot \left(\frac{r_{es} \cdot l_{\max}^2 \cdot \alpha}{C_w \cdot \Delta T_{\max} \cdot S_{cu}} \right)^{1.85} \quad 8)$$

which must also be iterated as 6).

The TCV coil cooling parameters are computed using the formula 6) with a fixed friction factor : $\lambda(\text{Re}) = 7.1E-3$. This value has been obtained from similar coils designed for the TCA tokamak. A comparison with the results obtained with 8) shows that 6) gives a slightly larger diameter and is therefore a safe design formula.

The values of v and r_{es} are taken for $T = 50^\circ \text{C}$.

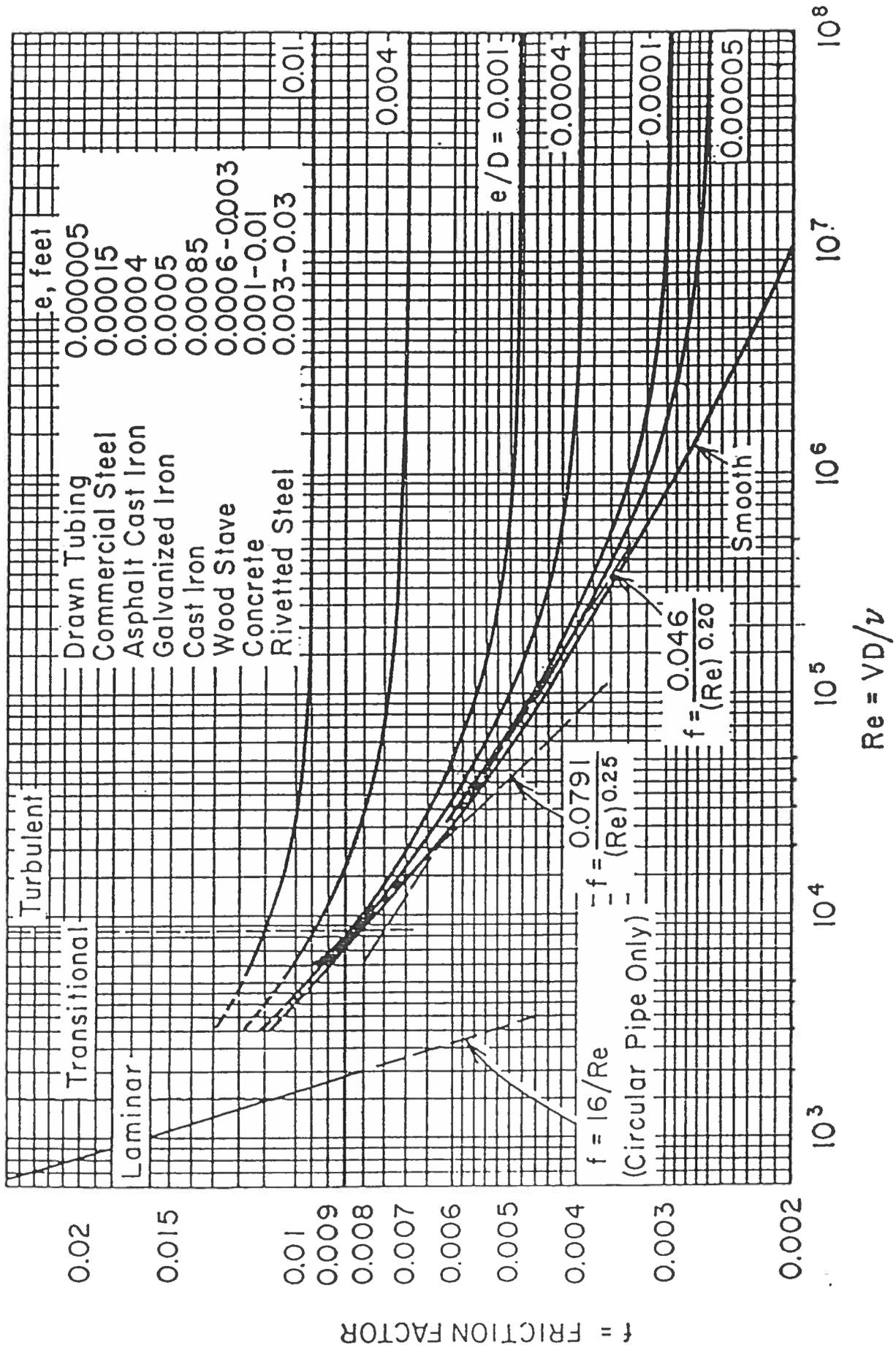


Fig. 4.1. Friction factor for flow in circular pipes. [Moody (5)].