

# Determinação de parâmetros característicos de um alternador de polos salientes a partir de ensaios

CARLOS F. R. LEMOS ANTUNES

Prof. Doutor Eng. Elect. (F. C. T.-U. C.)

Gabinete de Investigação e Desenvolvimento (FRAPIL — Aveiro)

## resumo

São revistos os ensaios tipo utilizados em fábrica na determinação dos parâmetros de um alternador de polos salientes. É apresentado o procedimento utilizado para a determinação dos parâmetros longitudinais significativos da máquina síncrona nomeadamente as reactâncias subtransitória, transitória e permanente e respectivas constantes de tempo, com aplicação a um caso prático.

## 1. Introdução

O interesse na realização de ensaios de alternadores de polos salientes reside na necessidade de confirmar as características previstas no projecto, bem como obter os parâmetros do modelo matemático da máquina. Em relação a este último aspecto e até há relativamente poucos anos havia a necessidade de

## abstract

*This paper summarizes the standard factory tests used in the determination of the synchronous machine parameters. It is presented the procedure to calculate the most significant direct axis parameters, the subtransient, transient and synchronous reactances as well as consequent time constants, with reference to a practical example.*

conhecer um número reduzido de parâmetros nomeadamente a reactância síncrona (para estudos sobre a regulação de tensão) e a reactância de curto-circuito (para estudos de curto-circuito). Hoje há a necessidade de conhecer um número maior e mais preciso de parâmetros, que são fundamentais para o estudo do alternador em situações transitórias, para a solução de problemas de controlo e de estabilidade.



Quando surge um defeito numa rede de potência a corrente de circulação é determinada pelas f.e.m.'s das máquinas geradoras e suas impedâncias e pela impedância da rede entre as máquinas e o local do defeito. Há uma diferença considerável entre a corrente de curto-circuito que circula num alternador após a ocorrência de curto-circuito trifásico e o seu valor permanente, que é devida ao fenómeno de reacção do induzido da máquina. Verifica-se um decaimento essencialmente exponencial entre o valor da corrente inicial do curto-circuito e o valor permanente, sendo a taxa de variação de corrente muito maior nos instantes iniciais.

A escolha e dimensionamento do equipamento de protecção para uma rede de potência depende não só da corrente nominal de funcionamento mas também da corrente máxima possível que o referido equipamento terá de suportar instantaneamente e do valor da corrente que terá de cortar à tensão da linha no local em que está situado. Donde ser necessário determinar a corrente inicial de curto-circuito no sistema a fim de poder escolher um equipamento com capacidade de corte suficiente.

De um modo geral são utilizadas as reactâncias subtransitórias para determinar a corrente de curto-circuito inicial que fixa a capacidade de corte do equipamento de protecção. Em relação a problemas de estabilidade, nomeadamente perdas eventuais de sincronismo da máquina com o sistema nos instantes de tempo imediatamente posteriores ao defeito, são utilizadas as reactâncias transitórias.

Apesar de se ter assistido a uma evolução no crescimento e complexidade de modelos da máquina síncrona, a informação obtida a partir de ensaios tem permanecido praticamente a mesma. Isto deve-se essencialmente a questões de ordem prática. Efectivamente existem limitações energéticas quanto às necessidades de accionamento e dissipação da energia gerada donde os diversos fabricantes preferirem os ensaios económicos, onde a potência absorvida é uma fracção pequena da potência nominal da máquina, em detrimento dos ensaios em carga [1]. Os ensaios económicos típicos que referimos são o ensaio em circuito aberto, em curto-circuito e de factor de potência nulo. Mesmo em relação a este último, poderão haver dificuldades quando a potência nominal da máquina é elevada. A segunda limitação prática é que os ensaios de curto-circuito a partir dos quais se determinam as reactâncias de curto-circuito e respectivas constantes de tempo são geralmente realizadas para um valor reduzido de tensão, donde não corresponderem aos níveis de fluxo com que a máquina trabalha. Efectivamente um curto-circuito trifásico à

tensão nominal provoca efeitos mecânicos severos nas cabeças das bobinas estatóricas e por esse motivo os parâmetros são obtidos a partir do ensaio em curto-circuito para valores baixos de tensão (geralmente até 65 % da tensão nominal) sendo em seguida extrapolados para a tensão nominal.

Neste artigo são passados em revista os ensaios referidos anteriormente, apresentando o procedimento utilizado para a determinação dos parâmetros significativos da máquina síncrona, nomeadamente as reactâncias longitudinal, transitória, subtransitória e permanente e respectivas constantes de tempo subtransitória e transitória.

## 2. Ensaios realizados em regime estacionário

### 2.1. Característica em vazio saturada

Esta característica é obtida accionando a máquina a ser ensaiada à velocidade nominal com os terminais do induzido em circuito aberto e variando o campo de excitação da máquina. Retiram-se os valores da tensão nos terminais correspondentes a cada valor da corrente de excitação até valores de tensão da ordem de 1,2 p.u.

O andamento desta característica é semelhante à característica de magnetização. Assim, e de um modo geral, a curva terá um andamento linear para tensões inferiores a 0,8—0,9 p.u., que prolongada corresponde à linha de entreferro da máquina.

Para tensões acima deste valor a densidade de fluxo (especialmente no rotor e nos dentes do estator) corresponde geralmente a níveis correspondentes à saturação, donde um aumento de f.m.m. rotórica não produz um aumento proporcional do fluxo enca-deado idêntico ao verificado na parte linear da característica (fig. 1).

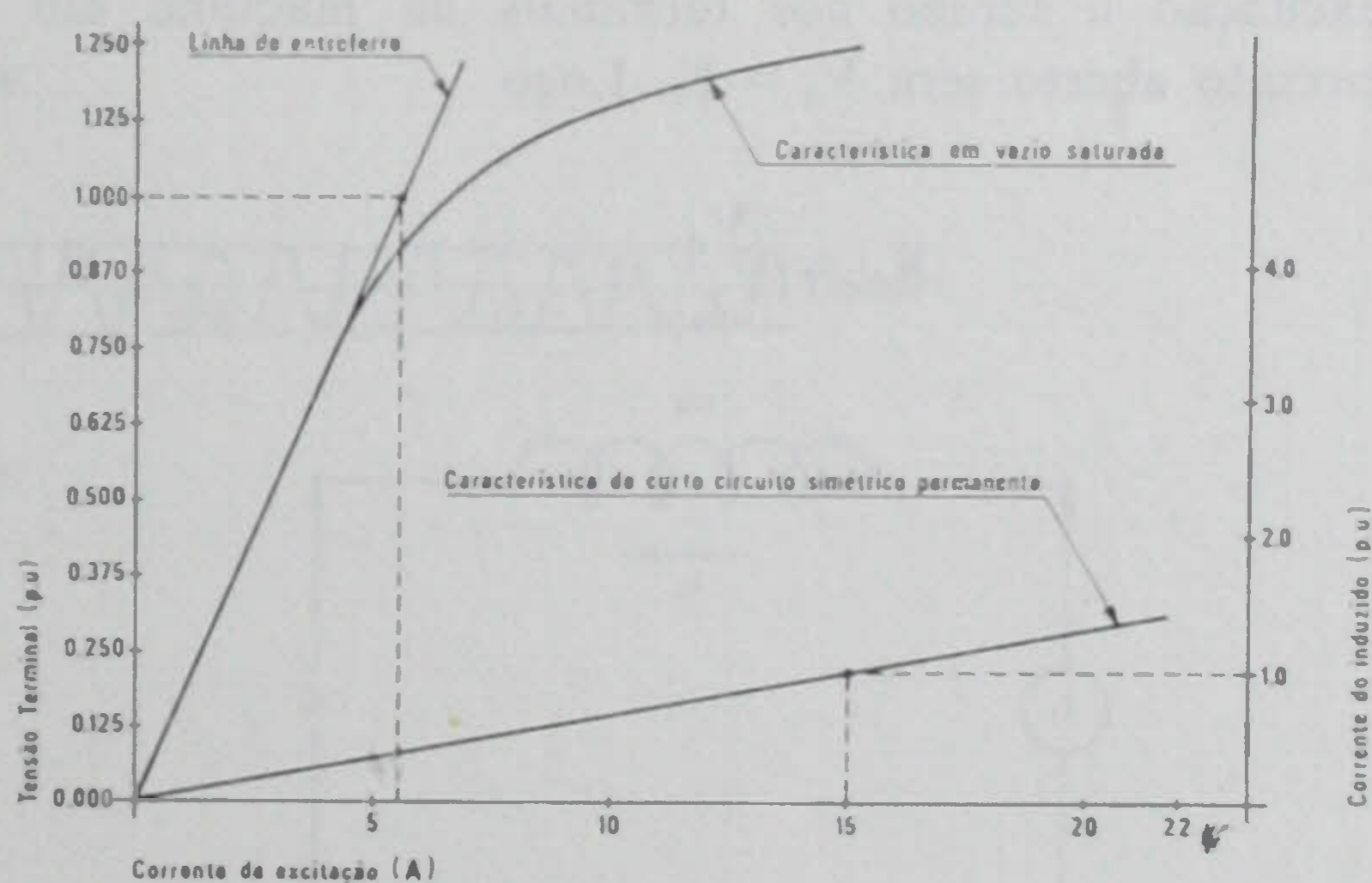


Fig. 1 — Característica em vazio saturada e de curto-circuito simétrico permanente. Alternador Frapil (60 kVA; 230/400; 1500 r.p.m.; 50 Hz)



Este ensaio permite ainda confirmar a corrente de excitação necessária para obter o valor de tensão em vazio bem como determinar a reactância síncrona longitudinal  $X_d$ .

## 2.2. Característica de curto-circuito simétrico permanente

Esta característica é obtida accionando a máquina a ser ensaiada à velocidade nominal com os terminais do induzido curto-circuitados e variando o campo de excitação da máquina. É obtida a lei de variação da corrente do induzido com a corrente de excitação quando esta é variada de zero a um nível geralmente correspondente à corrente nominal do induzido.

Como a máquina está em curto-circuito, isso significa que estará a trabalhar a um nível de densidade de fluxo bastante inferior àquele a que trabalha no ensaio em circuito aberto. Por esse motivo, e para os valores de corrente com que se trabalha, a característica de curto-circuito é um segmento de recta (fig. 1).

## 2.3. Determinação de $X_d$

A reactância síncrona longitudinal  $X_d$  é uma reactância equivalente que caracteriza o eixo longitudinal de uma máquina síncrona durante o funcionamento em regime estacionário. Pode ser considerada como uma reactância equivalente entre f.e.m. interna (isto é, a tensão que seria induzida no enrolamento estatórico em circuito aberto) e a tensão nos terminais da máquina. A reactância síncrona pode portanto ser obtida a partir das características em circuito aberto e em curto-circuito considerando o circuito equivalente da figura 2.

Com os terminais curto-circuitados a corrente estatórica será  $I_s$ . Para o mesmo valor da corrente de excitação a tensão nos terminais da máquina em circuito aberto será  $V_t = E_t$ . Logo

$$|X_d| = \frac{|V_t|}{|I_s|} \Omega \quad (1)$$

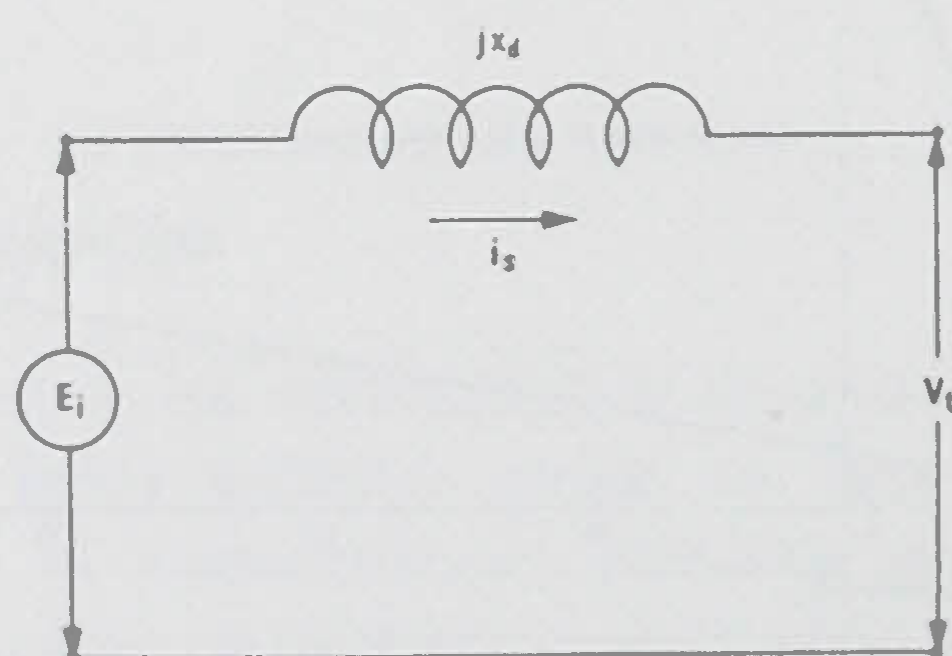


Fig. 2 — Circuito equivalente para o eixo longitudinal em regime estacionário

e como o valor da resistência é bastante inferior ao valor da reactância síncrona  $X_d$  toma-se este valor como característico da impedância síncrona.

O valor não saturado da reactância síncrona  $X_d$  (p.u.) é a razão entre a corrente de excitação para a corrente do induzido (1 p.u.) e a corrente de excitação para a tensão nominal (1 p.u.) não saturada i.e. lida na linha do entreferro. Como exemplo, na figura 1 a corrente de excitação para  $I_s = 1$  p.u. vale 15 A, a corrente de excitação para  $V_t = 1$  p.u. vale 5,5 A, logo

$$X_d = \frac{15}{5,5} = 2,727 \text{ p.u.} \quad (2)$$

## 3. Determinação de parâmetros a partir do curto-circuito instantâneo

### 3.1. Curto-circuito trifásico instantâneo

O curto circuito trifásico instantâneo é realizado accionando o alternador à velocidade de sincronismo com os terminais estatóricos em circuito aberto. A tensão de excitação é aplicada ao enrolamento de campo e variada até a tensão estatórica atingir o valor desejado (geralmente inferior à tensão nominal). Os terminais do induzido são então curto circuitados o mais simultaneamente possível, devendo ser mantidas a velocidade e a tensão do campo.

O ensaio dura alguns segundos que é o tempo necessário para que a corrente de curto-circuito atinja o valor estacionário permanente.

### 3.2. Determinação de parâmetros referentes ao eixo longitudinal

Considere-se um alternador onde os enrolamentos têm resistência desprezável, com excitação separada a funcionar em vazio. Curtocircuitando os seus terminais estatóricos, circulará uma corrente de curto-circuito nos seus enrolamentos.

Inicialmente a corrente de curto-circuito é função do valor da f.e.m. e da reactância de fugas da máquina assumindo, portanto, um valor bastante elevado. Este valor é ainda afectado pelo valor da tensão no instante de curto-circuito. Por exemplo, se o curto-circuito surge num instante próximo do valor de tensão nulo a corrente de curto-circuito é quase o dobro daquela que surge quando o curto-circuito é aplicado um instante próximo do valor de tensão máximo.

Após alguns ciclos a reacção do induzido faz com que haja uma redução da f.e.m. e daí da corrente de curto-circuito, até ao valor estacionário que é determinado pela reactância síncrona  $X_d$  da máquina.



O método de obtenção dos parâmetros pressupõe um modelo de máquina síncrona que neste caso é baseado numa representação a dois eixos, o longitudinal e o transversal com duas constantes de tempo.

Pode ser provado que nas condições indicadas as correntes de curto-circuito nas três fases A, B e C são dadas pelas seguintes expressões:

$$\begin{aligned} i_A &= I_1 \cos(\omega t + \theta) + I_2 \cos \theta + I_3 \cos(2\omega t + \theta) \\ i_B &= I_1 \cos(\omega t + \theta - 2\pi/3) + I_2 \cos(\theta - 2\pi/3) + \\ &\quad + I_3 \cos(2\omega t + \theta - 2\pi/3) \\ i_C &= I_1 \cos(\omega t + \theta - 4\pi/3) + I_2 \cos(\theta - 4\pi/3) + \\ &\quad + I_3 \cos(2\omega t + \theta - 4\pi/3) \end{aligned} \quad (3)$$

onde

$$I_1 = \left[ \frac{E}{X_d} + \left( \frac{E}{X'_d} - \frac{E}{X_d} \right) \exp\left(-\frac{t}{T'_d}\right) + \left( \frac{E}{X''_d} - \frac{E}{X'_d} \right) \exp\left(-\frac{t}{T''_d}\right) \right]$$

$$I_2 = -\frac{E}{X_m} \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right); \quad X_m = \frac{2 X''_q X'_d}{X''_q + X'_d}$$

$$I_3 = -\frac{E}{X_n} \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right); \quad X_n = \frac{2 X''_q X'_d}{X''_q - X'_d}$$

com

$X''_d$  — reactância longitudinal subtransitória

$X'_d$  — reactância longitudinal transitória

$X_d$  — reactância síncrona

$X''_q$  — reactância transversal subtransitória

$T'_d$  — constante de tempo transitória

$T''_d$  — constante de tempo subtransitória

$T_a$  — constante de tempo do induzido

Pode verificar-se que, de um modo geral, a corrente em cada fase contém dois tipos de componentes:

- uma componente alternada simétrica que é inicialmente função da reactância de fugas e que vai sendo atenuada até ao valor da corrente de curto-circuito permanente;
- uma componente unidireccional de cuja amplitude é determinada pelo valor da tensão no instante de curto-circuito (sendo nula quando a tensão passa pelo valor máximo, curto-circuito simétrico, ou máxima quando a tensão passa pelo valor zero, curto-circuito assimétrico) que é atenuada rapidamente nos primeiros ciclos.

Existe uma componente de frequência dupla da fundamental correspondente ao termo

$$-\frac{E}{2} \cdot \frac{X''_q - X'_d}{X''_q \cdot X'_d} \exp\left(-\frac{t}{T_a}\right) \cos(2\omega t + \theta)$$

desprezável na maior parte dos casos pois  $X''_q \simeq X'_d$ .

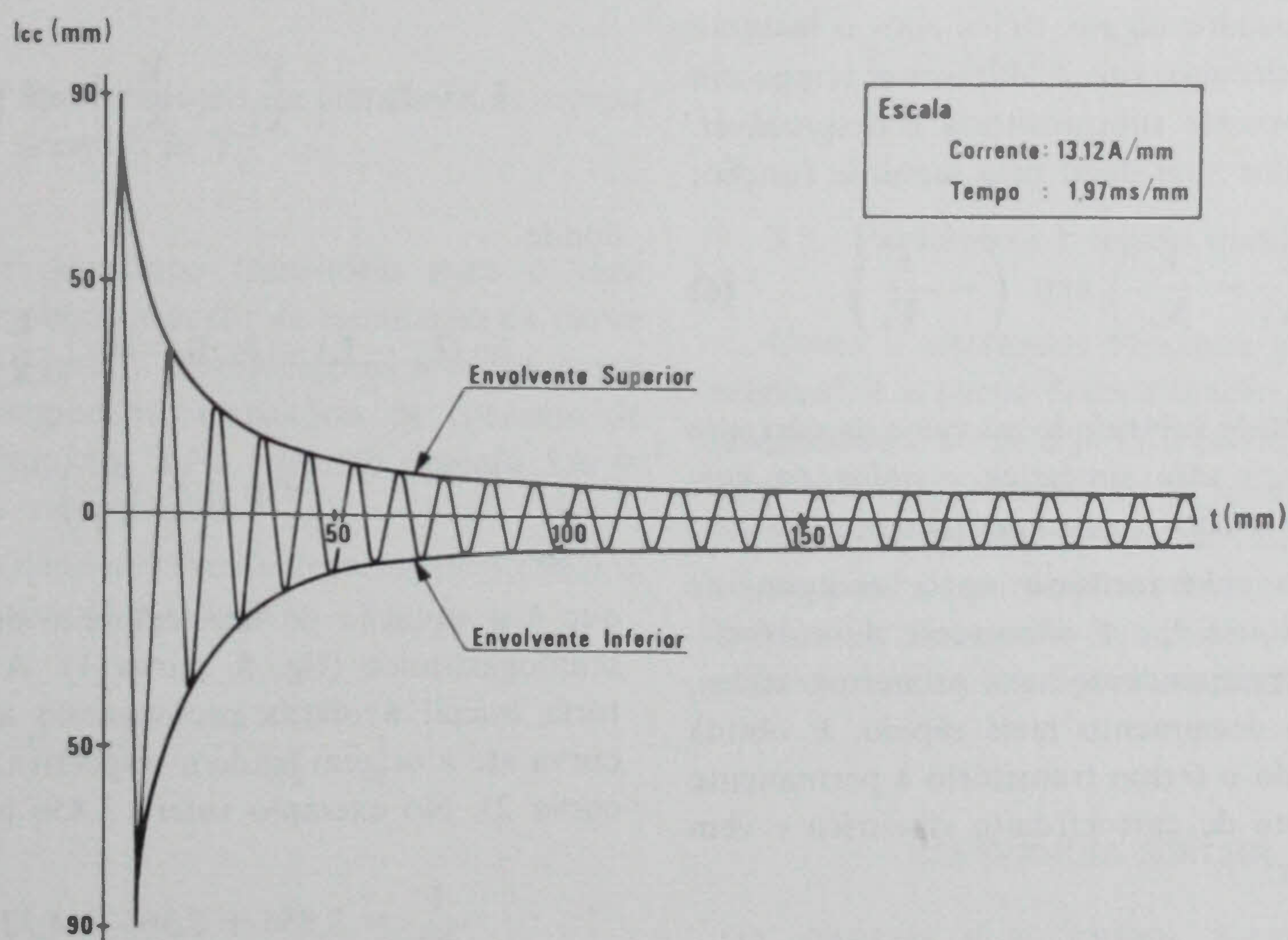


Fig. 3 — Corrente de curto-circuito trifásica instantânea  $I_{cc}$  de um alternador Frapil (60 KVA; 230 + 400 V; 1 500 r.p.m.; 50 HZ)



Indica-se na figura 3 um oscilograma da corrente de curto-circuito numa fase e respectivas envolventes para um curto-circuito instantâneo trifásico e simétrico de um alternador FRAPIL (60 kVA,  $U_n = 230/400$  V,  $n = 1500$  r.p.m., 50 Hz, sem escovas, campo girante).

A componente simétrica é obtida subtraindo a componente contínua (d.c.) à corrente de curto-circuito da fase respectiva (fig. 4).

A sua envolvente obedece à seguinte expressão:

$$I_{cc} = \frac{E}{X_d} + \left( \frac{E}{X'_d} - \frac{E}{X_d} \right) \exp \left( -\frac{t}{T'_d} \right) + \left( \frac{E}{X''_d} - \frac{E}{X_d} \right) \exp \left( -\frac{t}{T''_d} \right) \quad (4)$$

onde se podem observar três termos nitidamente diferenciados:

- O termo permanente ou a componente síncrona  $I_s$ : para um curto-circuito prolongado é o valor permanente da corrente de curto-circuito e que virá dada por:

$$I_s = \frac{E}{X_d} \quad (5)$$

onde  $X_d$  é a reactância síncrona longitudinal a que já se fez referência.

- O termo transitório ou a componente transitória  $I_{tr}$ : É a corrente de curto-circuito que existe passados alguns ciclos após o instante de curto-circuito, isto é, durante o tempo em que a corrente subtransitória é desprezável. O seu valor vem dado pela seguinte função:

$$I_{tr} = \left( \frac{E}{X'_d} - \frac{E}{X_d} \right) \exp \left( -\frac{t}{T'_d} \right) \quad (6)$$

e será obtida subtraindo ao valor da corrente de curto-circuito simétrica o valor da corrente de curto-circuito permanente.

- O termo subtransitório ou a componente subtransitória  $I_{str}$ . É a corrente de curto-circuito correspondente aos primeiros ciclos, com um decaimento mais rápido. É obtida subtraindo o termo transitório e permanente à corrente de curto-circuito simétrica e vem dada por:

$$I_{str} = \left( \frac{E}{X''_d} - \frac{E}{X'_d} \right) \exp \left( -\frac{t}{T''_d} \right) \quad (7)$$

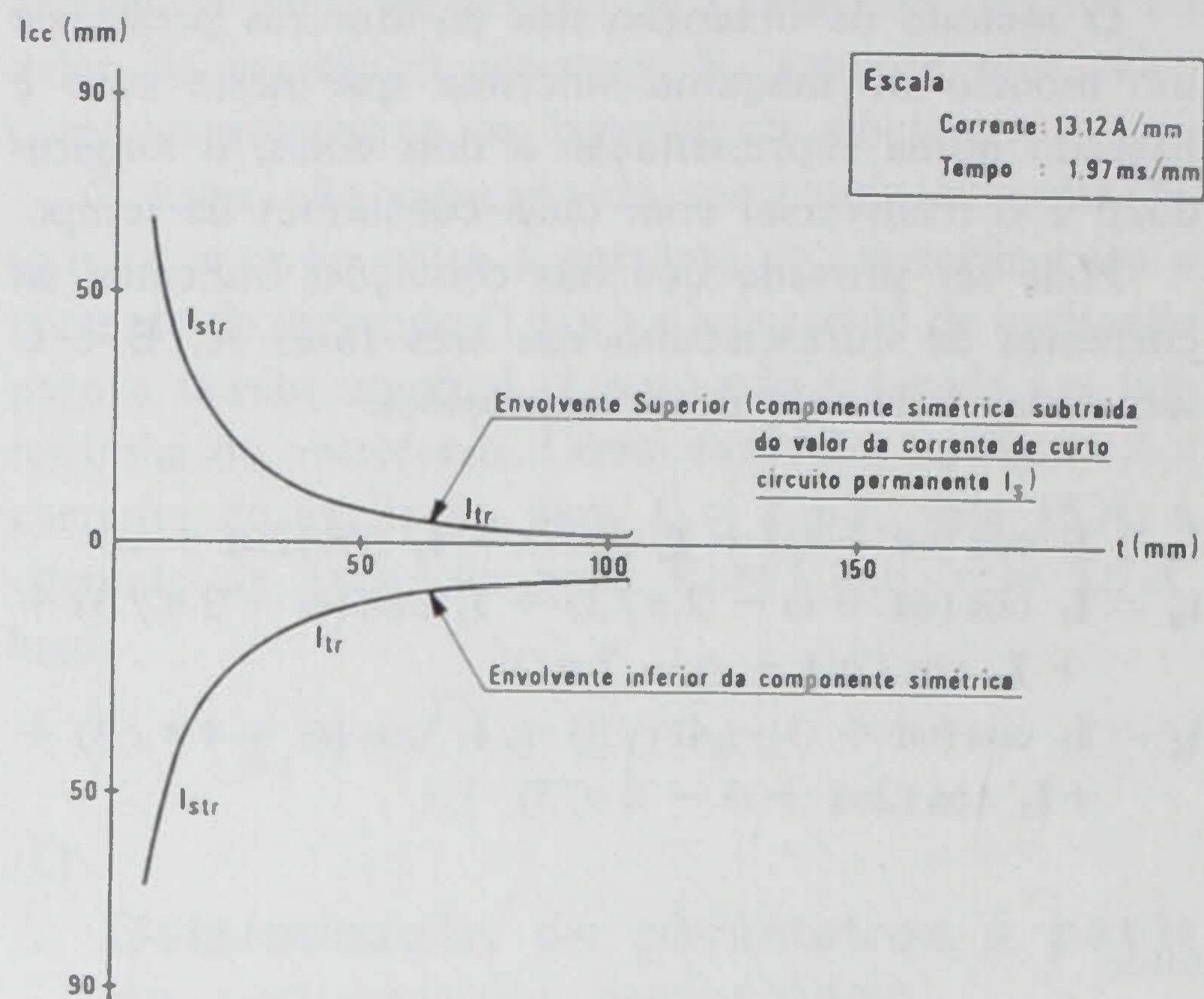


Fig. 4 — Componentes transitórios  $I_{tr}$  e subtransitória  $I_{str}$  da corrente de curto-circuito trifásica instantânea  $I_{cc}$

### 3.2.1. Determinação da reactância transitória $X'_d$

A reactância transitória pode ser obtida a partir da equação (4). A constante de tempo subtransitória  $T''_d$  é muito menor que a constante de tempo transitória  $T'_d$ , donde o terceiro termo de (4) ser desprezável passados alguns ciclos após o curto-circuito. Subtraindo o valor da corrente de curto-circuito permanente  $I_s$  à corrente total  $I_{cc}$  obtemos a expressão da corrente de curto-circuito quando a componente subtransitória é desprezável

$$I_{cc} - I_s = \left( \frac{E}{X'_d} - \frac{E}{X_d} \right) \exp \left( -\frac{t}{T'_d} \right) \quad (8)$$

donde

$$\ln (I_{cc} - I_s) = \ln I_{tr} = \ln \left( \frac{E}{X'_d} - \frac{E}{X_d} \right) \exp \left( -\frac{t}{T'_d} \right) \quad (9)$$

que é a equação de um segmento de recta no plano semilogarítmico (fig. 5, curva 1). A corrente transitória inicial é obtida prolongando a parte linear da curva até à origem lendo a respectiva ordenada (fig. 5, curva 2). No exemplo valerá 3,856 p.u., donde

$$\frac{1}{X'_d} = 3,856 + 0,366 = 4,222$$

$$X'_d = 0,237 \text{ p.u.}$$



### 3.2.2. Determinação da reactância subtransitória $X_d''$

A reactância subtransitória é determinada de um modo semelhante. Subtraindo à componente simétrica (eq. 4) a corrente estacionária  $I_s$  e a corrente transitória  $I_{tr}$  (curva 1 menos a curva 2 da figura 5) e referindo essa evolução num plano semilogarítmico obtém-se a curva 3 da figura 5. Prolongando esta curva até à origem obter-se-á a corrente subtransitória inicial. No exemplo valerá, 8,784 p.u.

A corrente inicial de curto-circuito será dada por

$$I_{cc}|_{t=0} = I_0 = (I_s + I_{tr} + I_{str})|_{t=0}$$

isto é,

$$I_0 = 0,366 + 3,856 + 8,784 = 13,006 \text{ p.u.}$$

e como

$$I_0 = \frac{E}{X_d''}$$

será

$$X_d'' = \frac{E}{I_0} = 0,077 \text{ p.u.}$$

### 3.2.3. Determinação da constante de tempo transitória $T_d'$

A constante de tempo transitória para o eixo directo pode ser obtida a partir da inclinação da curva apresentada na figura 5. Consideremos a curva 2 que representa a componente transitória da corrente de curto-circuito. Para  $t = T_d'$  a corrente descera  $1/e = 0,368$  do seu valor inicial.

No exemplo dado a corrente decresce de 3,856 p.u. para 1,071 p.u. em 45 ms, logo

$$\frac{1,071}{3,856} = \exp\left(-\frac{45 \times 10^{-3}}{T_d'}\right)$$

donde

$$T_d' \simeq 35,2 \text{ ms.}$$

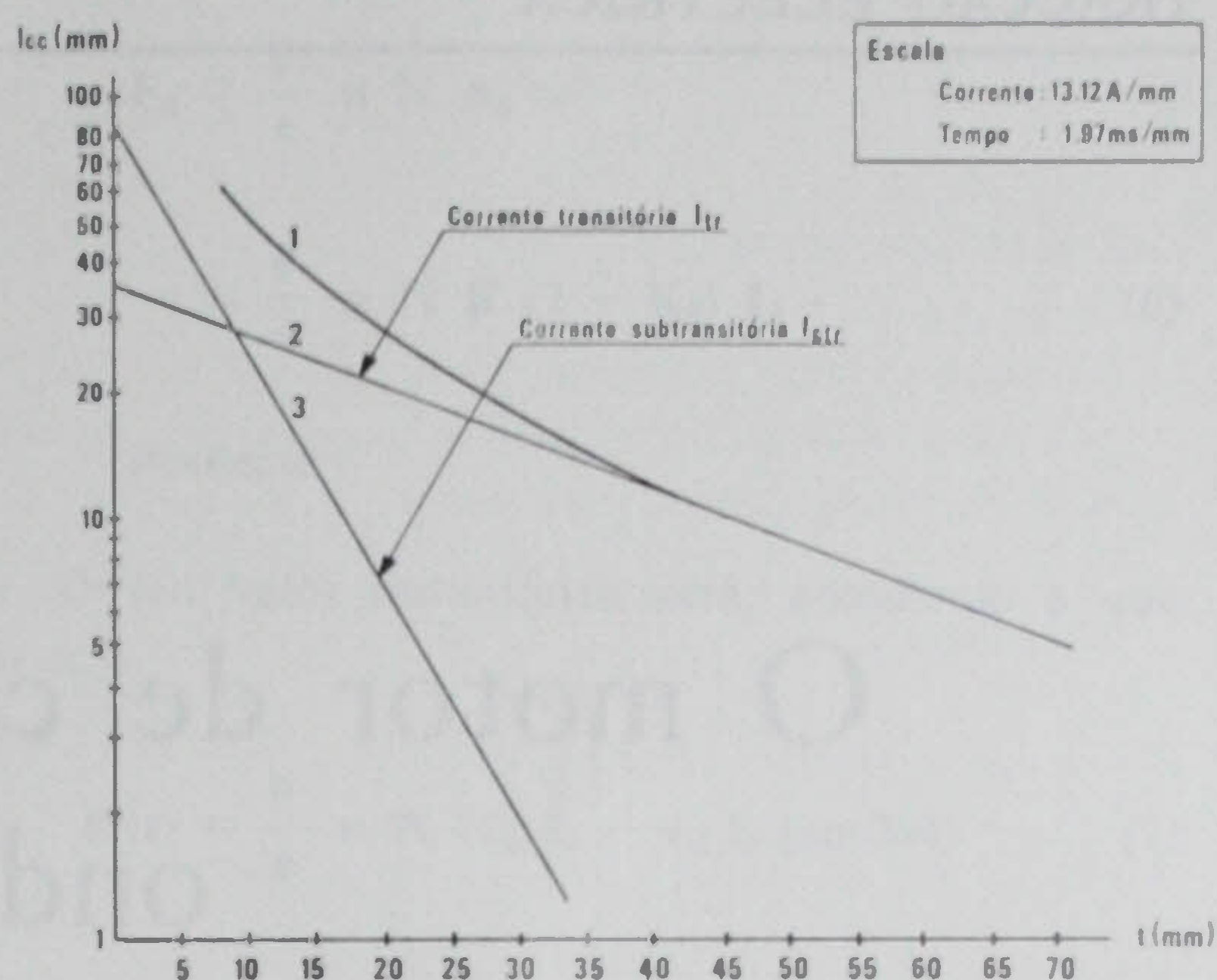


Fig. 5 — Componente transitória  $I_{tr}$  e subtransitória  $I_{str}$  da corrente de curto-circuito trifásica instantânea  $I_{cc}$

### 3.2.4. Determinação da constante de tempo subtransitória

A constante de tempo subtransitória é determinada de um modo similar. Em relação à figura 5 a corrente subtransitória decresce de 8,784 p.u. para 0,535 p.u. em 22,5 ms portanto,

$$\frac{0,535}{8,784} = \exp\left(-\frac{22,5 \times 10^{-3}}{T_d''}\right)$$

e assim

$$T_d'' \simeq 8,0 \text{ ms.}$$

### 3.3. Parâmetros à tensão nominal

Como o alternador funciona geralmente à tensão nominal, é a partir desta situação que o curto-circuito normalmente surge e só interessam os parâmetros para este valor de tensão. Se o ensaio de curto-circuito trifásico for realizado para um valor de tensão inferior ao nominal os parâmetros devem ser calculados para cada valor de tensão reduzido e o seu valor extrapolado para as condições nominais.

### REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- [1] CARLOS F. R. LEMOS ANTUNES et al — *Ensaio económico de alternadores em carga*, Congresso 83 da Ordem dos Engenheiros, Novembro 83, Porto.