

AÇOS PARA CONCRETO PROTENDIDO ⁽¹⁾

JEAN N. KINSCH ⁽²⁾

RESUMO

O Autor apresenta um resumo das características tecnológicas dos principais grupos de aços tensores para utilização em obras de concreto protendido. Expõe em linhas gerais os processos de fabricação para os materiais mencionados. O trabalho é encerrado com um quadro das características e conclusões sobre emprêgo recomendado dos diversos grupos de aços tensores.

1. GENERALIDADES

Um dos inconvenientes do concreto armado comum, material heterogêneo, consiste no aproveitamento incompleto dos materiais empregados: o concreto e a armadura. Este inconveniente pode ser suprimido, em grande parte, pelo emprêgo de concreto protendido. Segundo uma definição de Freyssinet, protender uma construção consiste em criar dentro da mesma, artificialmente e antes da aplicação de cargas externas ou simultaneamente com estas, tensões de compressão permanentes. Enquanto o valor dos esforços de tração, devido as cargas externas, fica inferior a soma aritmética das tensões de compressão da protensão e da resistência à tração do concreto, este último pode ser considerado como um material homogêneo.

As tensões de compressão são aplicadas, normalmente, por tensores de arames ou barras de aço, que são tracionados e ligados ao concreto, neste estado tendido, por meios adequados. O concreto é assim comprimido devido a tendência do tensor elástico de adquirir sua forma (comprimento) original.

A história do concreto protendido remonta à do início do concreto armado. Já desde então espíritos progressistas tinham compreendido a importância do protendido. As tentativas realizadas até 1927, aproximadamente, não produziram porém resultados satisfatórios, visto que ainda não se compreendia que nenhuma protensão poderia ser permanente se ela não fôsse executada com aços tendo um limite elástico muito elevado.

(1) Contribuição Técnica n.º 498. Apresentada ao XVIII Congresso Anual da Associação Brasileira de Metais; Belo Horizonte, julho de 1963.

(2) Membro da ABM Engenheiro Metalurgista pela Escola Técnica Superior de Luxemburgo; Chefe da Trefilaria da Cia. Siderúrgica Belgo-Mineira; Monlevade e Cidade Industrial; MG.

Foi o engenheiro Freyssinet que sublinhou este fato. Foi ele, portanto, quem mais fez para permitir a utilização do protendido permanente ou, mais corretamente, do concreto cuja protensão não diminui com o tempo mais que 10% a 15%, diminuição que é perfeitamente admissível, visto que o calculista a considera em seus cálculos e projetos. Descoberto o princípio fundamental, era necessário passar da teoria à aplicação. O problema se constituía, principalmente, na inexistência de material e ferramentas adequadas.

Freyssinet, na França, e Magnel, na Bélgica, são os pioneiros que desenvolveram os sistemas necessários para a introdução definitiva do concreto protendido na construção de pontes, vigas, recipientes, etc. Outros, como Leonhardt, Baur, Morandi, Birkenmeier, etc., inventaram e aperfeiçoaram sistemas de protensão para as mais diversas utilizações.

A experiência acumulada em aproximadamente 35 anos, em que obras importantes foram executadas em concreto protendido, permitem a conclusão de obras de sempre maior envergadura. O emprêgo de concreto protendido permite realizar apreciável economia dos materiais utilizados. Comparado com o concreto armado comum, esta economia atinge 15% a 30% de concreto e 40% a 80% de aço. O preço da construção é normalmente também inferior ao de similar construção em concreto armado.

Exemplo de economia é o indicado por G. Magnel em publicação preliminar do 3.º Congresso da "Association Internationale des Ponts et Charpentes" (1948), "*Les applications du beton pré-contraint en Belgique*", na qual compara material e preço de construção para lajes de 20 m de vão de uma ponte com 6 vigas paralelas de estrada de ferro:

	<i>Concreto armado simples</i>	<i>Concreto protendido</i>
Espessura (m)	1,85	1,15
Volume de concreto (m ³)	145	85
Aço doce (t)	26	0,7
Aço duro em fio (t)	—	5,5
Aço para ancoragem (t)	—	2,6
Preço em francos belgas	232.000	197.000

Existem muitos outros casos onde o emprêgo do concreto protendido é indicado, não tanto por motivos econômicos, como por motivos técnicos, em peças sujeitas a choque — como por exemplo em dormentes de concreto para ferrovias — ou onde é necessário evitar quaisquer fissuras — como nas peças expostas a ambientes agressivos e corrosivos — ou ainda quando há necessidade de se reduzirem ao mínimo as dimensões transversais — peças premoldadas, pontes de pouca altura sobre rios navegáveis ou sobre estradas de rodagem, etc.

2. TENSORES

No decorrer dos anos, as buscas de melhorias das características mecânicas dos aços conduziram a 4 grupos principais de tensores, os quais serão tratados em seguida. Distinguímos os seguintes grupos: *Grupo A* — barras ou arame laminado; *Grupo B* — Arame temperado/revenido; *Grupo C* — Arame encruado a frio; *Grupo D* — Cordoalhas e cabos de aço.

Os materiais tensores acima relacionados podem ser utilizados para ancoragem das extremidades ou ancoragem por aderência, conforme a secção, superfície ou método de fabricação.

GRUPO A — BARRAS OU ARAME LAMINADO

Tratam-se de aços ao carbono, de baixa liga de Si e Mn, fornecidos em rolos ou barras em dimensões até 30 mm de diâmetro. As barras são fornecidas sem tratamento térmico, com resistência natural do material laminado. Os arames são fornecidos, geralmente, normalizados em rolos de aproximadamente 1,50 a 1,80 m de diâmetro, o que é suficiente para serem autodesenroláveis e evitar tensões secundárias nas zonas da periferia, prejudiciais ao limite de fluência, relativamente elevada, em aços deste tipo.

No Quadro 1 reúnem-se as características de aços SIGMA, produzidos pela firma Hüttenwerk Rheinhausen AG.

QUADRO 1¹
Aços SIGMA para protendido

Denominação	Estado; diâmetro em mm	Limite elástico σ 0,01 Kg/mm ²	Limite elástico σ 0,02 Kg/mm ²	Resistência à tração Kg/mm ²	Alongamento na ruptura $1=10 \times d$ %	Limite de fluência Kg/mm ²
BARRAS						
Sigma	laminado,					
St 55/85	10 a 20	50	55	85	10	50
Sigma	laminado,					
St 60/90	15 a 30	55	60	90	8	55
Sigma	laminado,					
St 70/105	8 a 12	63	70	105	8	65
ARAME						
Sigma	normaliza-					
St 70/105	do, 5 a 8	63	70	105	8	65

A figura 1¹ mostra o diagrama tensão/deformação para um aço SIGMA 55/85 e 60/90. A figura 2¹ mostra as curvas de fluência dos aços SIGMA 55/85 e 60/90 sob tensão de tração uniforme de 50 kg/mm².

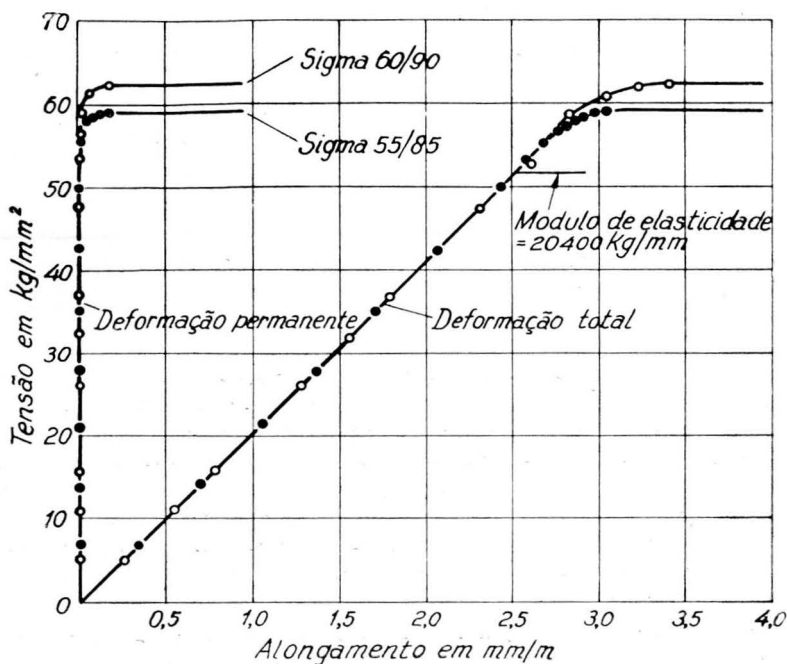


Fig. 1¹ — Diagrama tensão/deformação dos aços SIGMA 55/85 e 60/90.

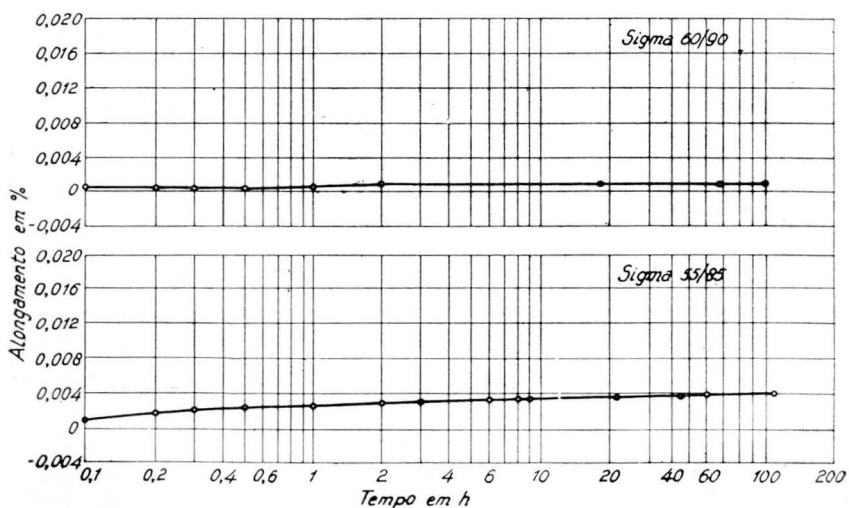


Fig. 2¹ — Curvas de fluência de aços SIGMA 55/85 e 60/90 sob tensão de tração constante de 50 kg/mm^2 .

Os aços do “Grupo A” terão a sua utilização limitada aos casos nos quais o emprêgo de barras de grande secção e de baixa resistência seja mais econômico que a utilização de arames finos de alta resistência.

GRUPO B — ARAME TEMPERADO/REVENIDO; ARAME AUSTEMPERADO E MARTEMPERADO

a) ARAME TEMPERADO/REVENIDO — Empregado em grande quantidade, os arames dêste grupo sofrem um tratamento térmico adequado para atingir as características de elevada resistência e elasticidade que outros arames possuem por encruamento a frio. Obtém-se resistência à ruptura até aproximadamente 170 kg/mm².

São notáveis neste material as excelentes características mecânicas (elevado limite elástico, de proporcionalidade e de fluência). A aderência dentro do concreto é elevada, devido a superfície ligeiramente oxidada durante o processo de fabricação. O arame (enrolado em rolos de diâmetros variáveis entre 1,50 e 2,00 m) é autodesenrolável e reto. Em vista destas qualidades e do seu preço inferior ao do arame trefilado para protendido, êste material é largamente empregado.

Material — Para a fabricação de arame temperado/revenido, emprega-se aço ao carbono e aço carbono de baixa liga de Mn e Si, tendo aproximadamente a seguinte composição química, em %: C = 0,60/0,70; Mn = 0,90/1,20; Si = 0,8/1,2; P = 0,040 max; S = 0,040 max.

Produção — Em geral, a têmpera é feita diretamente sôbre o fio máquina laminado. Para os casos onde são necessárias tolerâncias mais estreitas, submete-se o mesmo a uma passagem de trefilação antes da têmpera.

O arame é temperado em processo contínuo. A instalação de têmpera consiste de desenroladeiras, forno de aquecimento, banho de revenimento de chumbo e enrolador. A figura 3 mostra esquematicamente uma instalação de têmpera. O enrolador possui bobinas de diâmetro adequado para garantir o autodesenrolamento do arame temperado.

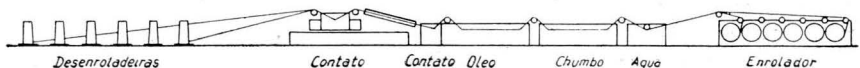


Fig. 3 — Esquema de instalação de têmpera; aquecimento elétrico dos arames.

Tipos — Distinguímos os arames para utilização com ancoragem por aderência e com ancoragem por meio de mordentes. Para ancoragem por aderência empregam-se, principalmente, arames de perfil retangular ou oval com nervuras transversais para aumentar a resistência ao deslizeamento. As secções usuais variam entre 20 e aproximadamente 70 mm². São fornecidos em rolos com diâmetro de 1,50 a 2,00 m e em pesos entre 90 e 150 kg.

Para ancoragem das extremidades por mordentes empregam-se, além de perfis redondos em bitolas entre 5 e 9,5 mm de diâmetro (3/16" até 3/8"), também os perfis ovais e retangulares. Poder-se-á empregar também estes arames com nervuras transversais para aumentar a aderência no concreto.

Características — Ver Quadro 2¹ seguinte:

QUADRO 2¹

Características de alguns arames temperados/revenidos

Denominação	Dimensões mm	Limite elástico σ 0,02 Kg/mm ²	Resistência à tração Kg/mm ²	Limite elástico σ 0,01 Kg/mm ²	Limite de fluência (*) Kg/mm ²	Módulo de elasticidade Kg/mm ²	Alongamento na ruptura $1 = 10 \times d$ Kg/mm ²
Sigma 145/160	8,0 × 2,8	145	160	120	115	20.500	6
Neptun 145/160	6,7 × 3,0	145	160	120	115	20.500	6
Sigma 145/160	5,2 \emptyset	145	160	120	115	20.500	6
Sigma 135/150	8,0 \emptyset	135	150	110	105	20.500	6

(*) Conforme DIN 4227.

Na figura 4 temos o diagrama tensão/deformação de um arame temperado e revenido de 8 × 2,8 mm. As figuras 5a e 5b mostram a estrutura de um arame temperado e revenido com estrutura perlítica encruada de um arame patentado.

Estudos sobre o procedimento de arames temperados/revenidos, com referência e fluência, foram feitos especialmente por engenheiro da firma Hüttenwerk Rheinhausen. A figura 6¹ mostra o diagrama de fluência de um arame temperado "Neptun" de 6,7 × 3,0 mm, de fabricação da firma Felten & Guillaume, da Alemanha.

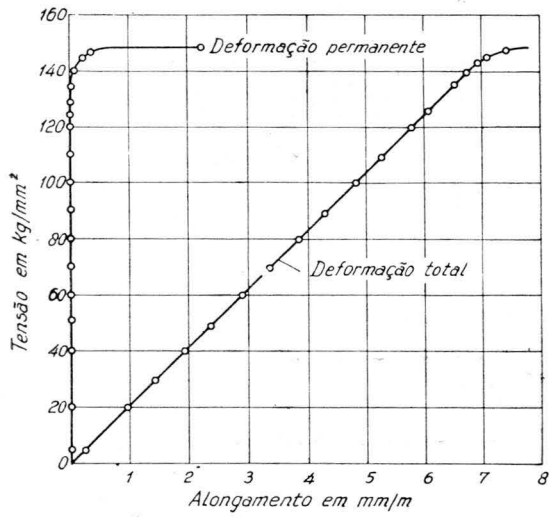


Fig. 4 — Diagrama tensão/deformação de arame de aço temperado/revenido SIGMA 8 x 2,8 mm (conf. W. Janiche, W. Puzicha e S. Bohnenberger).

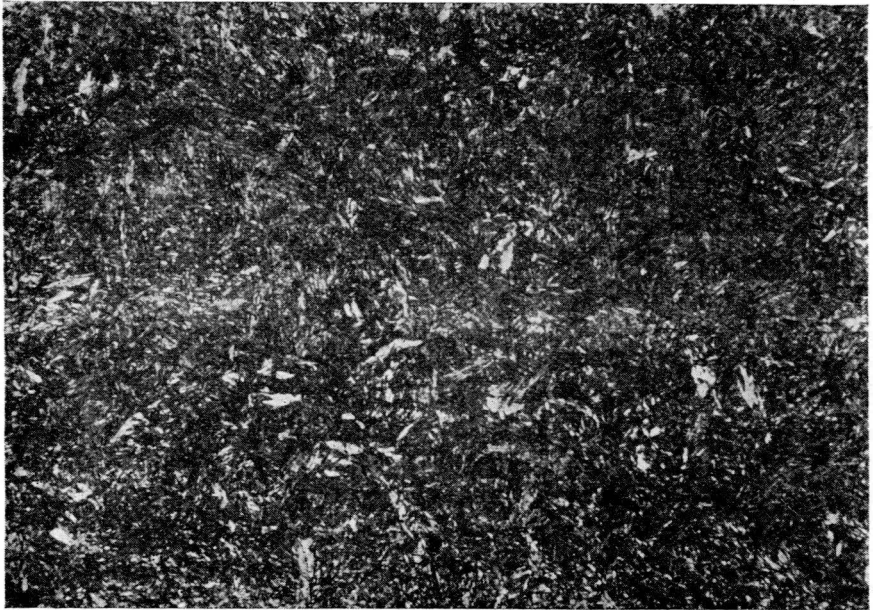


Fig. 5a — Estrutura de um arame temperado/revenido.

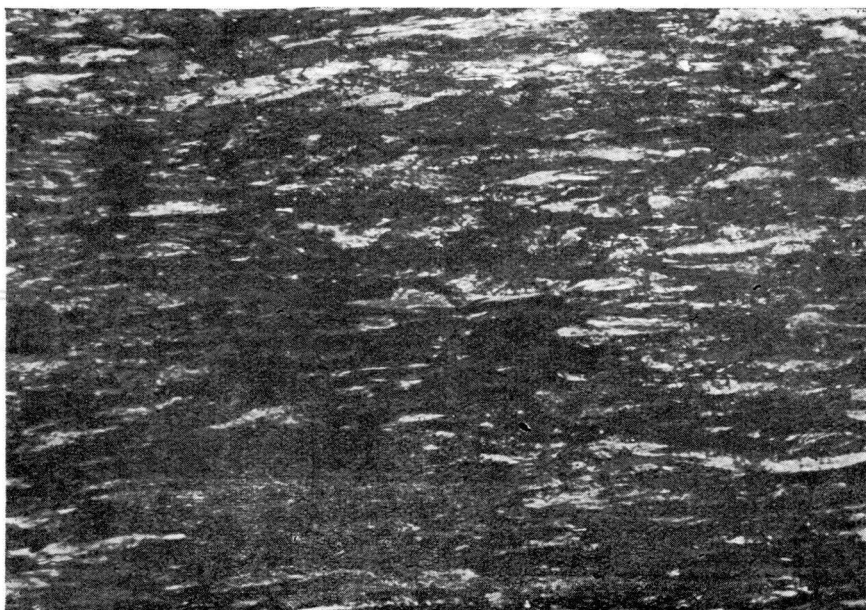


Fig. 5b — Estrutura de um arame patenteado e encruado a frio.

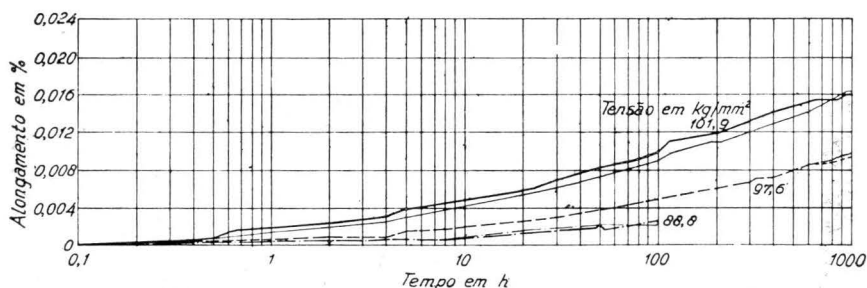


Fig. 6¹ — Curva de fluência de um arame de aço temperado/revenido "Neptun" 6,7 × 3,0 mm sob tensão constante.

b) ARAME AUSTEMPERADO E MARTEMPERADO — Os tratamentos isotérmicos são tratamentos modernos e ainda pouco empregados para a produção de arames para concreto protendido. Têm um futuro promissor, em vista das boas qualidades que são obtidas com o seu uso. A figura 7²³ mostra o diagrama esquemático de transformação para austêmpera; a figura 8²³ o diagrama esquemático de transformação para martêmpera. A figura 9¹ mostra o diagrama TTT para arame de aço 0,7% a 0,8% de C. Daí se podem tirar os programas de esfriamento, de modo a se obterem as estruturas desejadas.

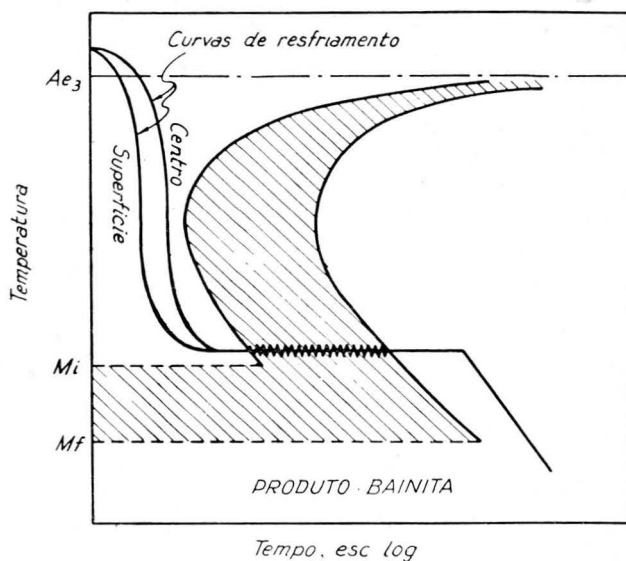


Fig. 7²³ — Diagrama esquemático de transformação para austêmpera.

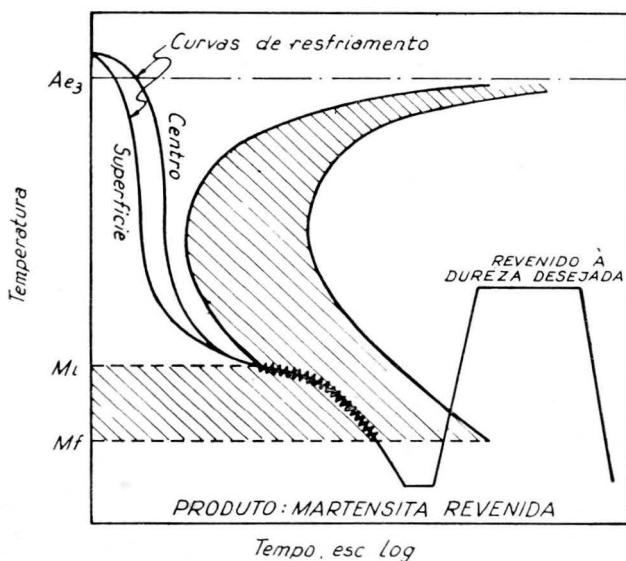


Fig. 8²³ — Diagrama esquemático de transformação para martêmpera.

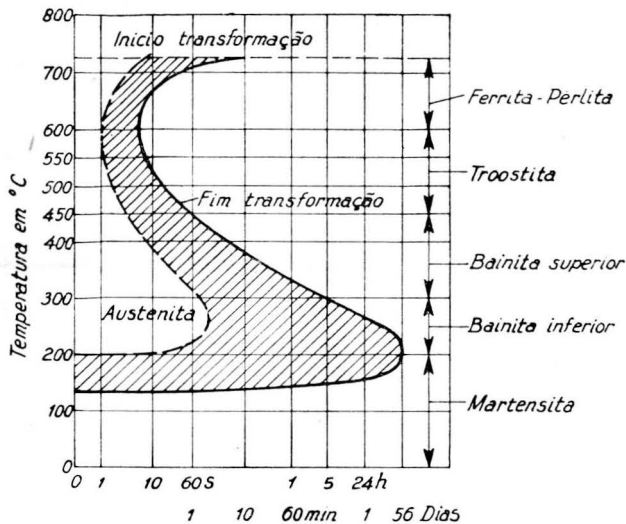


Fig. 9¹ — Diagrama TTT para arame de aço de 0,7% a 0,8% de C.

Material austemperado pode ser utilizado diretamente ou pode ser encruado a frio, em uma ou duas passagens de trefilação. Visto que a tensão de ruptura do arame com estrutura bainítica é mais elevada que a do mesmo material patenteado e com estrutura perlítica — 140 kg/mm² contra 120 kg/mm² para um aço de aproximadamente 0,70% de C — a resistência à tração obtida por encruamento a frio, em uma ou duas passagens, é também proporcionalmente mais elevada. O encruamento a frio se limita normalmente a uma passagem com redução de secção variando entre 25% a 40%.

A figura 10 mostra o aspecto típico da estrutura bainítica de um arame de aço de 0,78% de C austemperado. A figura 11⁵ mostra esquematicamente a evolução da temperatura durante a martêmpera de arame de aço.

O meio de esfriamento usado neste processo é, em geral, um banho de sal ou de liga chumbo/antimônio/cádmio/estanho, de baixo ponto de fusão. Os arames assim produzidos são perfeitamente retos e autodesenroláveis quando enrolados em condições adequadas.

A austêmpera e a martêmpera de arames são feitas, como o patenteamento, em processo contínuo. O arame é desenrolado, aquecido à temperatura adequada e resfriado em meio apro-

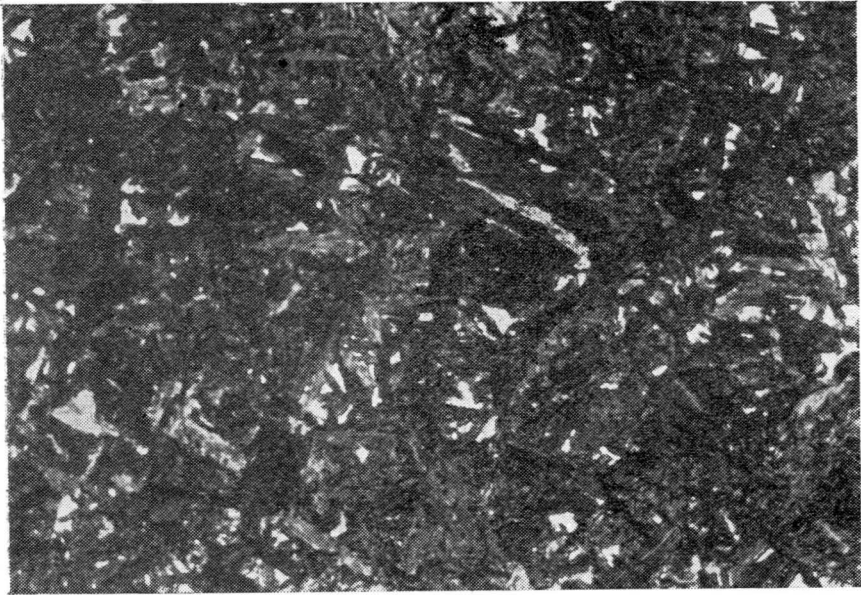


Fig. 10 — Aspecto micrográfico de arame de aço austemperado, bainita.
Ataque nital $\times 750$.

MARTEMPERA

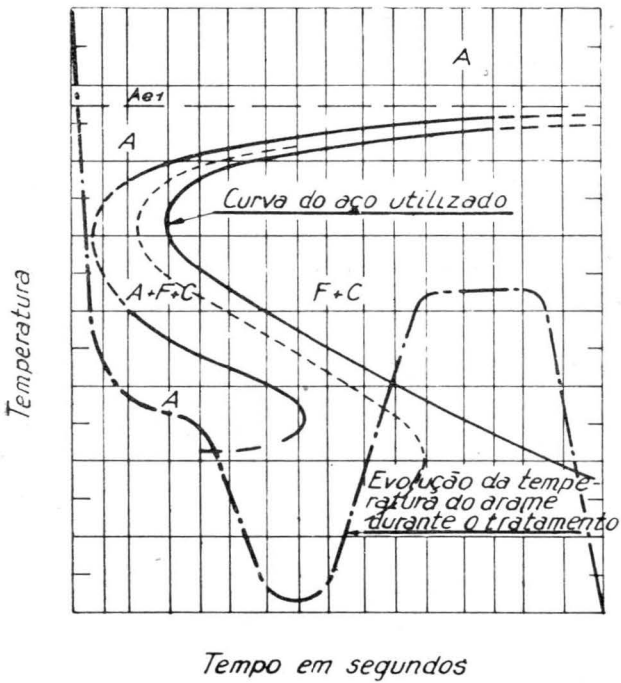


Fig. 11^s — Evolução da temperatura do arame durante o tratamento de martêmpera.

priado, revenido no caso da martêmpera, resfriado e enrolado, em bobinas de diâmetro suficiente para não provocar tensões superficiais que ultrapassem o limite elástico dos arames. Estes diâmetros variam normalmente entre 1,20 e 2,00 m. Arame martemperado é produzido com fio máquina ou com arame trefilado. Este último para as bitolas mais finas.

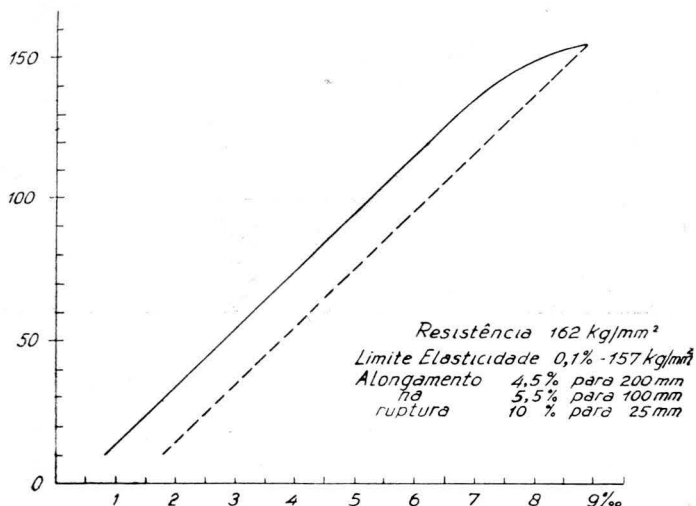


Fig. 12⁵ — Diagrama tensão/deformação de arame 5,00 mm Ø martemperado.

A figura 12⁵ mostra os diagramas tensão deformação de arame 5,00 mm Ø liso, martemperado, fabricado pela firma Sambre-Escout. O Quadro 3⁵ indica as características normais de diversos fios fabricados por martêmpera pela mesma firma.

QUADRO 3⁵

Características de diversos fios martemperados

Diâmetro mm	Designação	Tensão de ruptura Kg/mm ²	Limite elástico a 0,1% Kg/mm ²
2 a 3	Ø LM 170/160	170/180	160
3,5 a 5	Ø LM 160/150	160/170	150
6 a 7	Ø LM 150/140	150/160	140

GRUPO C — ARAME ENCRUADO A FRIO

Os arames dêste Grupo são os mais largamente utilizados, principalmente devido à sua alta resistência à tração, seu elevado limite elástico e às demais características, que permitem seu emprêgo em tôdas as obras de concreto protendido. Tratam-se de arames de aço "patenting", encruados a frio por laminação ou trefilação, fabricados de maneira a se obter as características necessárias para a sua finalidade.

Material — Emprega-se normalmente aço da seguinte composição em %: C = 0,65/0,90; Mn = 0,40/1,10; Si = 0,10/0,30; P = 0,040 max; S = 0,040 max.

Produção — Conforme o processo de fabricação escolhido, sofre o fio máquina um patenteamento no ar, que consiste em aquecê-lo à uma temperatura acima de Ac 3, seguido de resfriamento ao ar. A estrutura assim obtida é perlítica, favorável à definição a frio. O arame é, em seguida, trefilado ao diâmetro necessário para obtenção das características desejadas depois do último patenteamento, seguido do encruamento final.

O último patenteamento se faz com resfriamento no Pb a temperaturas entre 450°C e 550°C, quando se obtém estrutura perlítica fina. O encruamento a frio é feito em uma ou mais passagens, por laminação ou trefilação. O arame trefilado é, somente em alguns casos, utilizado neste estado. A maioria é, em seguida à trefilação, endireitado e aliviado de tensões.

Tipos — Distingue-se também, neste Grupo, material destinado a ancoragem por aderência e ancoragem por mordentes. Para ancoragem por aderência empregam-se arames redondos abaixo de 2,5 mm, nos quais a superfície, relativamente grande em comparação com a secção, garante aderência suficiente no concreto. Arames de diâmetros superiores devem ser endentados, para aumentar a superfície ou modificá-la, a fim de se conseguir características adequadas para aumentar a aderência.

Os arames são enrolados, depois de aliviados de tensões, em rolos com diâmetro suficientemente grande para evitar que as tensões de tração, provocadas nas zonas superficiais, se tornem superiores ao limite elástico convencional σ 0,01%. Estas tensões são determinadas pela equação:

$$\sigma = \frac{d}{D} \cdot E,$$

na qual d = diâmetro do arame; D = diâmetro do rôlo e E = módulo de elasticidade.

Características — Dão-se em seguida as características de arames de aço “patenting” para concreto protendido, obtidos em ensaios feitos em arames da nossa fabricação corrente, BEMA 125/140. Foram realizados ensaios em amostras de 10 rolos de arame de 5 e 7 mm de diâmetro, cada amostra envolvendo os estágios: trefilado, endireitado e aliviado. Foram determinadas as características físicas dos mesmos e traçados os respectivos diagramas tensão/deformação.

Ensaio com arames BEMA 125/140, de 5 mm (ver Quadro 4):

Análise %: C — 0,78; Mn — 0,77; P — 0,016.

QUADRO 4

Resumo das características dos arames de 5 mm

Características		Trefilado	Endireitado	Aliviado
Resistência	Kg/mm ²	147,0 — 172,0	138,5 — 166,5	144,5 — 167,5
Alongamentos %	10 d	6,0	8,0 — 10,0	8,0 — 10,0
	100 mm	3,0 — 4,0	4,5 — 7,0	5,5 — 8,0
	200 mm	2,0 — 2,5	3,5 — 5,0	4,5 — 5,5
Limite elast.	Kg/mm ² 0,2 %	115,0 — 126,5	98,0 — 104,0	125,5 — 129,0
Limite elast.	Kg/mm ² 0,01 %	48,0 — 53,5	69,0 — 79,0	120,0 — 128,0
Módulo de elastic.	Kg/mm ²	21.150 — 22.100		
Ensaio de flexão		6,0 — 10,0	5 — 11	6 — 11

A figura 13 mostra o diagrama tensão/deformação de uma das amostras ensaiadas nos estados trefilado, endireitado e aliviado de tensões.

Ensaio com arames BEMA 125/140, de 7 mm (ver Quadro 5):

Análise %: C — 0,79; Mn — 0,84; P — 0,023.

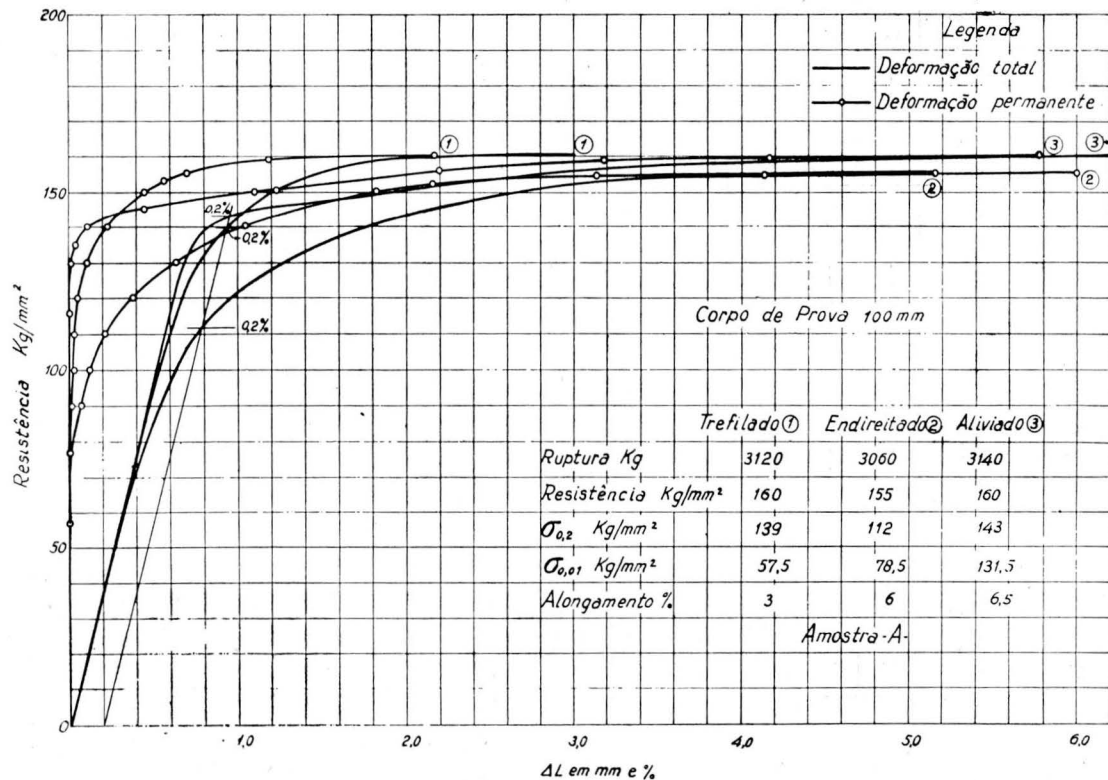


Fig. 13 — Diagrama tensão/deformação em arame BEMA 125/140, \varnothing 5 mm trefilado, endireitado e aliviado.

QUADRO 5

Resumo das características dos arames de 7 mm

Características		Trefilado	Endireitado	Aliviado
Resistência	Kg/mm ²	148,0 — 159,0	138,0 — 151,5	147,0 — 155,5
Alongamentos %	10 d	7,14	8,6 — 10,0	8,6 — 10,0
	100 mm	3,5 — 4,5	6,5 — 9,0	6,0 — 8,0
	200 mm	2,5 — 3,5	5,0 — 6,5	4,5 — 6,0
Limite elast.	Kg/mm ² 0,2%	120,0 — 140,0	100,0 — 106,0	124,5 — 134,5
Limite elast.	Kg/mm ² 0,01%	49,0 — 50,5	66,5 — 67,0	116,0 — 117,0
Módulo de elastic.	Kg/mm ²	21.000 — 22.100		
Ensaio de flexão		3 — 4	3 — 5	3 — 5

A figura 14 mostra o diagrama tensão/deformação em um dos arames ensaiados, nos estados trefilado, endireitado e aliviado de tensões. Resumiu-se no Quadro 6 a influência do endireitamento e do alívio de tensões sobre as características mecânicas dos arames ensaiados.

Fluência em arame a frio — Todo arame de aço, submetido à tensão de tração permanente relativamente elevada, sofre *fluência*, isto é, aumento de comprimento com o decorrer do tempo. Para arame trefilado, a fluência segue aproximadamente uma lei que diz: para qualquer nível de tensão, a importância da fluência aumenta com o logaritmo do tempo, isto é, a fluência medida durante a primeira hora dobrará depois de 10 h, triplicará depois de 100 h, quadruplicará depois de 1000 h, etc. Desta maneira, serão necessários aproximadamente 100 anos para duplicar a fluência no decorrer do primeiro mês.

Para arame aliviado de tensões, a fluência não mais segue a lei logarítmica, acima mencionada. A fluência é ligeiramente maior que o logaritmo do tempo. Os ensaios até hoje realizados por diversos pesquisadores confirmam porém que, com o decorrer do tempo, a fluência se reduz a valores negligenciáveis. Isto é ainda mais positivo, se as tensões de tração a que se

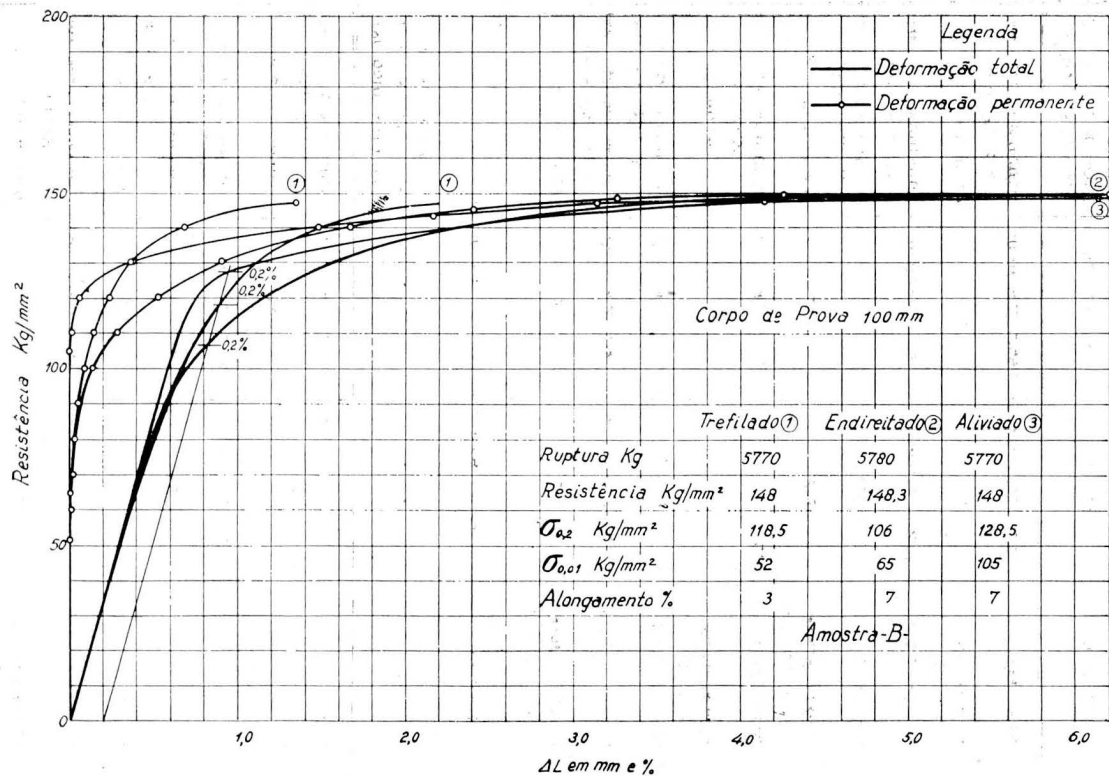


Fig. 14 — Diagrama tensão/deformação em arame BEMA 125/140, 7 mm trefilado, endireitado e aliviado.

QUADRO 6

Influência do endireitamento e alívio sobre algumas características mecânicas dos arames ensaiados

a) COMPARAÇÃO ENTRE TREFILADO E ENDIREITADO

Ø	Ensaio	Trefilado	Endireitado	Relação de características E/T (Valores médios)
5 mm	Resistência	155 Kg/mm ²	146,5 Kg/mm ²	Diminuiu 6% ou 8,5 Kg/mm ²
"	Alongamento 10 × d	6%	9%	Aumentou 50%
"	Límite 0,2%	122 Kg/mm ²	101 Kg/mm ²	Diminuiu 17% ou 21 Kg/mm ²
"	Límite 0,01%	50 Kg/mm ²	73 Kg/mm ²	Aumentou 46% ou 23 Kg/mm ²
"	Flexão sobre raio 15 mm	8,7	8,8	Aumentou 1%
7 mm	Resistência	152 Kg/mm ²	144 Kg/mm ²	Diminuiu 5,5% ou 8 Kg/mm ²
"	Alongamento 10 × d	7,5%	9,5%	Aumentou 27%
"	Límite 0,2%	117,5 Kg/mm ²	91 Kg/mm ²	Diminuiu 22,5% ou 26,5 Kg/mm ²
"	Límite 0,01%	49,5 Kg/mm ²	66,6 Kg/mm ²	Aumentou 34% ou 17,1 Kg/mm ²
"	Flexão sobre raio 15 mm	3,5	3,5	Não variou

b) COMPARAÇÃO ENTRE TREFILADO E ALIVIADO

Ø	Ensaio	Trefilado	Aliviado	Relação de características A/T (Valores médios)
5 mm	Resistência	155 Kg/mm ²	151,6 Kg/mm ²	Diminuiu 2,2% ou 3,4 Kg/mm ²
"	Alongamento 10 × d	6%	9%	Aumentou 50%
"	Límite 0,2%	122 Kg/mm ²	127,5 Kg/mm ²	Aumentou 4,5% ou 5,5 Kg/mm ²
"	Límite 0,01%	50 Kg/mm ²	123 Kg/mm ²	Aumentou 146% ou 83 Kg/mm ²
"	Flexão sobre raio 15 mm	8,7	8,5	Diminuiu 2,3%
7 mm	Resistência	152 Kg/mm ²	150 Kg/mm ²	Diminuiu 1,5% ou 2 Kg/mm ²
"	Alongamento 10 × d	7,5%	9,5%	Aumentou 27%
"	Límite 0,2%	117,5 Kg/mm ²	124 Kg/mm ²	Aumentou 5,5% ou 6,5 Kg/mm ²
"	Límite 0,01%	49,5 Kg/mm ²	116,3 Kg/mm ²	Aumentou 134% ou 66,8 Kg/mm ²
"	Flexão sobre raio 15 mm	3,5	3,8	Aumentou 8,6%

submeter o arame — a taxa de trabalho — ficarem inferiores a 65% da resistência à tração.

Foi realizado um ensaio de fluência em um arame de 7 mm e reproduzido na figura 15 o diagrama obtido. A instalação teve de ser improvisada, visto que a definitiva, em construção, não terminou em tempo para ser utilizada para o presente trabalho. Também limitou-se o ensaio a uma duração de 300 horas pelos mesmos motivos.

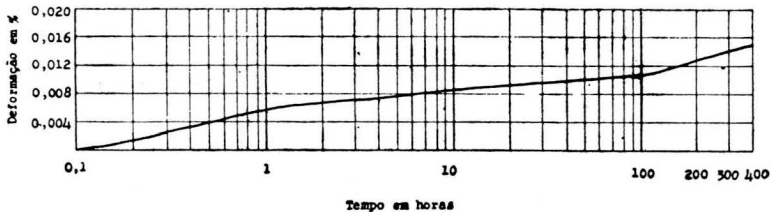


Fig. 15 — Fluência de um arame trefilado BEMA 115/140, de 7 mm de diâmetro sob carga constante de $0,6 \times$ tensão de ruptura.

GRUPO D — CORDOALHAS E CABOS DE AÇO

Nos últimos anos, o uso de cordoalhas e cabos, principalmente utilizados nos Estados Unidos da América do Norte, tende a generalizar-se; maiores quantidades já são usadas também nos outros países. As vantagens são as seguintes:

- 1.º) Possibilidade de fazer elementos tensores de elevada resistência e de grande comprimento;
- 2.º) Manipulação relativamente fácil, devido à flexibilidade dos elementos tensores.

Dos materiais descritos, parece ser este Grupo o que terá o maior desenvolvimento em futuro próximo.

Material — São fabricados principalmente com arames do Grupo C, encruados a frio. Excepcionalmente poderá ser utilizado para cabos de arames paralelos, arame temperado/revenido ou martemperado. São usualmente fabricados com arames nus, mas pode também sê-lo com arames galvanizados. Estes últimos serão principalmente empregados em cabos de arames paralelos, cabos helicoidais e cordoalhas expostas, em parte ou totalmente, ao tempo.

Fabricação — Cordoalhas de 7 fios são fabricadas de acordo com a Norma ASTM A-416 — 59-T ou de outra norma

estabelecida. São feitas com passo variando entre 12 e 16 vezes o diâmetro da cordoalha. Em seguida ao cordoalhamento, é a cordoalha endireitada, aliviada de tensões e enrolada em rolos com um diâmetro variável entre 1,20 e 1,80 m de diâmetro, ou sobre carretéis de madeira de tamanho adequado.

Cabos helicoidais são fabricados com número de arames variando entre 19 e 91. A camada externa dos cabos fechados é feita com arames de perfil em "Z". Cabos de arames paralelos são feitos com elevado número de arames, colocados paralelamente um ao lado do outro, formando um cabo de secção circular.

Tipos — Distinguem-se, como para os materiais dos grupos anteriores, os tipos para ancoragem por aderência e para ancoragem por mordentes nas extremidades. Para ancoragem por aderência empregam-se as cordoalhas de 7 fios. Os cabos são utilizados para ancoragem por mordentes.

Características — A figura 16 mostra o diagrama tensão/deformação de uma cordoalha de 7 fios de 3,00 mm \varnothing . No Quadro 7 indicam-se as características principais de cordoalha de 7 fios de aço BEMA 160/180-C. O Quadro 8 indica a carga aplicável em cordoalhas BEMA 160/180-C, para diversas taxas de tensão.

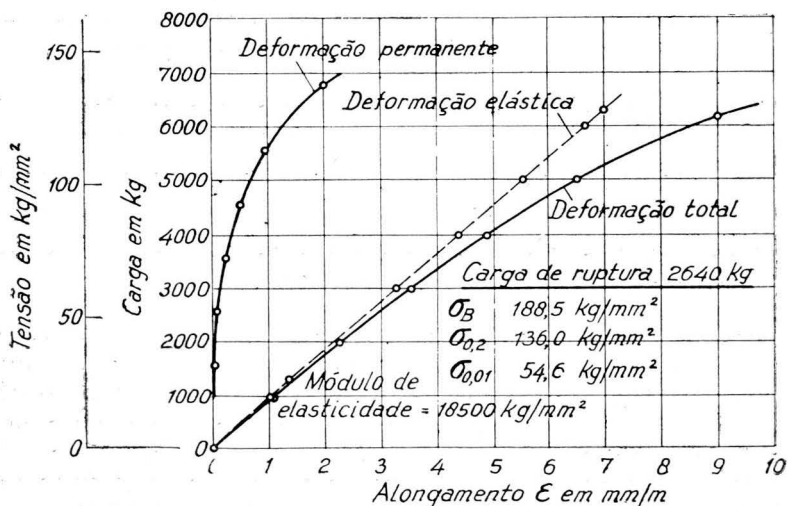


Fig. 16¹ — Diagrama tensão/deformação de cordoalha ST 180, 7 x 3,0 mm \varnothing .

QUADRO 7

Características de cordoalha de 7 fios, BEMA 160/180-C

Bitola	N.º de fios	Área útil da cordoalha mm ²	Carga de ruptura mínima Kg	Resistência mínima à tração Kg/mm ²	Comprimento da cordoalha fornecida em carretéis Metros	Pêso aprox. Kg/1000 m	Limite elástico 0,2% Kg/mm ²	Limite fluência de Kg/mm ²
1/4"	7	23,2	4.082	176	7.600	182	150	100
5/16"	7	37,4	6.580	176	4.600	295	150	100
3/8"	7	51,6	9.070	176	4.600 ou 3.050	408	150	100
7/16"	7	70,3	12.247	176	3.650 ou 3.050 ou 2.450	555	150	100
1/2"	7	92,9	16.329	176	2.750 ou 1.825	735	150	100
<p>Alongamento mínimo no arame individual: 6% em 10 × d Alongamento mínimo na cordoalha: 4% em 24" (610 mm) Módulo de elasticidade: aproximadamente 20.000 Kg/mm²</p>								

QUADRO 8

Carga aplicável em cordoalha BEMA 160/180-C para diversas taxas de tensão

Bitola	Carga de ruptura mínima Kg	Tensão aplicável para as seguintes taxas de carga (em % da resistência de ruptura)					
		50 % Kg	55 % Kg	60 % Kg	65 % Kg	66 2/3 % Kg	70 % Kg
1/4"	4.082	2.041	2.245	2.450	2.653	2.725	2.857
5/16"	6.580	3.290	3.619	3.948	4.277	4.392	4.606
3/8"	9.070	4.535	4.988	5.442	5.895	6.054	6.349
7/16"	12.247	6.123	6.736	7.348	7.960	8.175	8.573
1/2"	16.329	8.164	8.981	9.797	10.614	10.900	11.430

3. CORROSÃO SOB TENSÃO EM ARAMES PARA CONCRETO PROTENDIDO

Alguns anos atrás, casos de defeitos em construções de protendido começaram a atrair a atenção dos construtores. No Brasil sabemos, entre outros, o ocorrido na construção da ponte para a travessia do Delta do Guaíba, em Pôrto Alegre. Recentemente, algumas lajes de tetos de estábulos ruíram durante o inverno 62/63 na Alemanha.

Examinando os casos, constata-se que todos têm um denominador comum, que é o arame temperado/revenido. Em todos os casos, notou-se que a ruptura nos arames foi provocada por fragilização dos mesmos por corrosão sob tensão. Esta fragilização foi sempre devida às influências que agiram sobre o arame, depois que ele deixou a fábrica onde foi produzido.

A corrosão sob tensão é, como seu nome indica, uma ação corrosiva que age sobre um metal quando em um estado de tensão. Todos os metais estão sujeitos à mesma em determinadas condições. Contrariamente à corrosão normal, que destrói um metal por ação galvânica, diminuindo a secção da peça até que a mesma seja suficientemente enfraquecida para falhar, a corrosão sob tensão torna um metal extremamente frágil, sem produzir necessariamente sinais visíveis de corrosão.

Para arames de aço ao carbono, especialmente o temperado/revenido, foram reconhecidas até hoje, como sendo capazes de provocar falhas por corrosão sob tensão, principalmente soluções de nitratos e de gás sulfídrico.

Ensaio para determinar a diferença de sensibilidade à corrosão sob tensão entre arames temperados e arames trefilados, foram realizados por W. O. Everling e relatados no "The First National Prestressed Concrete Short Course" de outubro de 1955. O autor enrolou arames sobre um mandril com um diâmetro de 3 vezes o diâmetro do arame. O efeito de mola ("spring back") do arame criou, dentro das voltas enroladas, elevadas forças de tensão. Os arames enrolados foram submersos em solução quente de nitrato de amônio. Constatou que, das amostras de arame temperado/revenido, 25% estavam fragilizadas após 1 hora na solução e 100% depois de 4 horas. As amostras feitas com arame encruado a frio não se fragilizaram, mesmo após 1000 horas de ensaio.

Ensaio feito de modo similar, mergulhando os arames em solução de gás sulfídrico, provocaram fragilização nos arames

temperados/revenidos após 15 horas e mesmo em arame encruado a frio, após um pouco mais que 100 h. Menciona o autor que, possivelmente, a adição de cloreto de cálcio no concreto poderá também ser motivo de corrosão sob tensão.

No trabalho¹¹ que o Prof. Werner Grundig realizou sôbre as causas do rompimento dos arames tensores longitudinais, empregados na construção da ponte sôbre o Delta do Guaíba, o autor provou tratar-se de *fragilização pelo hidrogênio*, proveniente de H₂S. Informa que, para alisar as superfícies verticais de concreto para assentamento de macacos utilizados na protensão, utilizou-se uma "*massa sulfurosa fundida*", que foi preparada no estrado da ponte. Durante a fusão desta massa, despreendeu-se grande volume de gases; ao ser vertida, parte da massa introduziu-se entre arames. O autor demonstra que os arames rompidos se fragilizaram devido à presença da massa sulfurosa e dos gases, formados durante o seu preparo, em presença de umidade. (Ver referência 11).

A causa dos recentes acidentes com as lajes de estâbulos, na Alemanha, foi atribuída à utilização de uma qualidade inadequada de cimento (Tonerdeschmelzzement), cuja utilização já está proibida para obras em concreto protendido. (Na época da construção das lajes ruídas, aliás, tôdas fabricadas pela mesma firma construtora, a utilização do tipo de cimento, causados da corrosão sob tensão nos arames, estava ainda permitida pelas autoridades responsáveis pelas normas de construção na Bavária).

Conhecendo as causas provocadoras de corrosão sob tensão, o construtor deve evitá-las; muitos milhares de toneladas de arame temperado/revenido são usadas anualmente em construções de concreto protendido. Indicam-se no Quadro 9 as características principais dos aços dos Grupos A, B, C e D.

4. CONCLUSÕES

1.º) Recomenda-se o uso dos aços do "*Grupo A*" — *Laminados a quente* — para os casos nos quais o emprêgo de barras de grande secção e pequena resistência é mais econômico que a utilização de arames mais finos e de maior resistência.

2.º) *Arame temperado/revenido*, do Grupo B, deve ser utilizado tomando-se os necessários cuidados para evitar condições que possam provocar corrosão sob tensão, especialmente nas obras pós-tensionadas.

Resumo das características dos principais grupos de aços tensores para concreto protendido

GRUPO	Modo de fabricação e perfil	Bitola mm	Secção mm ²	Limite elástico	Limite elástico	Resistência mínima a ruptura	Alongamento	Limite de fluência	Módulo de elasticidade E
				0,01% Kg/mm ²	0,2% Kg/mm ²	Kg/mm ²	%	Kg/mm ²	Kg/mm ²
"A" - Laminado	Laminado; perfil redondo	10 a 20	78 a 314	50	55	85	10	50	21.000
		13 a 30	133 a 707	55	60	90	8	55	21.000
		8 a 12	50 a 113	63	70	105	8	65	21.000
"B" - Temperado/ Revenido	Temper./Revenido ou Martemperado. Perfis redondos e ovais-lisos e com nervuras-.	7 a 13	38 a 133	100	125	140	6	95	20.500
		6,0 a 9,5	28 a 71	110	135	150	6	105	20.500
		5 a 8	20 a 50	120	145	160	6	115	20.500
"C" - Encruados a frio	Encruado a frio por trefilação ou laminação. Perfis redondos e retangulares. Liso ou com superfície perfilada.	4 a 8	13 a 50	110	115	140	6	90	20.500
		4 a 8	13 a 50	115	125	140	6	95	20.500
		3 a 8	7 a 50	115	140	160	6	100	20.500
		3 a 7	7 a 38	125	150	170	6	105	20.500
		3 a 7	7 a 38	135	160	180	6	110	21.000
		2 a 4,5	3 a 16	135	180	200	6	120	21.000
"D" - Corda- lhas e Cabos	Arame encruado a frio. Perfil redondo. Cordalhas de 2,3 e 7 fios.	2a3 fios de 2,0 a 4,0	6 a 38	70	120	160	6 (aramé)	90	19.000
		2a3 fios de 2,0 a 4,0	6 a 38	90	140	170	6 (aramé)		19.000
		7 fios de 2,0 a 4,3	22 a 101	115	160	180	6 (aramé)	110	20.000

3.º) *Os aços do "Grupo C" — Encruados a frio —* são praticamente insensíveis à corrosão sob tensão. Deverão ser sempre fornecidos endireitados e aliviados de tensão. Para obras e estruturas circulares, tais como para tubos protendidos (nas quais o arame não precisa ser endireitado), o mesmo poderá, sob certas condições, ser utilizado no estado trefilado, visto que o limite elástico a 0,2% é razoavelmente elevado. Não deverão ser utilizados arames somente endireitados.

4.º) *"Grupo D" — Cordoalhas e cabos —* Uma grande vantagem da cordoalha de 7 fios é a ancoragem por aderência, dispensando uso de normas permanentes.

Cordoalha de 7 fios, fabricada com arames galvanizados a quente, recomenda-se para obras pós-tensionadas e para os casos em que parte da cordoalha ficará exposta à atmosfera.

Cordoalha de 19 e mais arames, cabos fechados e de arames paralelos, são usadas em obras pós-tensionadas, nas quais são necessários elementos tensores de grande resistência à tração. São fabricados de arames nus ou galvanizados. Este tipo de cordoalha ou cabo não é aliviado de tensões.

A GRADECIMENTOS

Agradeço a colaboração dos engenheiros e técnicos da Trefilação e do Departamento de Contrôlo e Pesquisas, especialmente aos colegas José Walmílio de Mello Monteiro e José Carlos Machado Zica, — que se encarregaram da realização dos ensaios.

BIBLIOGRAFIA

1. SCHWIER, F. — *Stahldrähte für Spannbeton. Stahldraht — Erzeugnisse.* Verlag Stahleisen M. B. M. Düsseldorf, 1956.
2. *DIN 4227 — Spannbeton, Richtlinien für Bemessung und Ausföhrung* Okt, 1953.
3. SCHWIER, F. — *Spannungskorrosion und Kriechen von hochfestem Stahldraht für Spannbeton.* "Wire and Wire Products", 12, 1955.
4. PAPSDORF, W. e SCHWIER, F. — *Kriechen und Spannungsverlust bei Stahldraht, insbesondere bei leicht erhöhten Temperaturen.* Stahl und Eisen" 78 (1958) Heft 14, Seite 937/47.
5. MAGNEL, G. — *Le Béton Précontraint.* Editions Fecheyr, Gand, 1953.
6. KOHLHASE, F. — *Hand und Tabellenbuch für die Drahtindustrie.* Emil Gribsch Verlag, Hamm, 1950.
7. *Metals Handbook.* The American Society for Metals, 1948.

8. GUYON, Y. — *Béton Précontraint*. Editions Eyrolles, Paris, 1958.
9. LEONHARDT, F. — *Spannbeton für die Praxis*. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn, Berlin, 1955.
10. EVERLING, W. O. — *Steel Wire for Prestressed Concrete*. Presented at "The First National Prestressed Concrete Short Course". Maritime Base, St. Petersburg, Florida.
11. GRUNDIG, W. — *A fragilização pelo hidrogênio como causa de ruptura de arames de aço para protender concreto*. ABM-Boletim, da Associação Brasileira de Metais, n.º 53, vol. 14, outubro de 1958.
12. TELEMACO VAN LANGENDONCK — *Cálculo de concreto armado*. Editora Científica, Rio de Janeiro, 1959.
13. *Bestimmungen des Deutschen Ausschusses für Stahlbeton*. Verlag von Wilhelm Ernst & Sohn. Berlin, 1960.
14. MÖLL, H. — *Spannbeton*. Berliner Union Stuttgart, 1954.
15. ABNT — *Normas Estruturais*, 1955.
16. ASTM — Part 1: *Ferrous Metals Specifications*, 1961.
17. P. C. ITEMS — Published by the Prestressed Concrete Institute, vol. 6, n.º 8-9.
18. *American Super-Tens Wire For Prestressed Concrete, American High Strength Strand*. American Steel & Wire Division, United States Steel.
19. SCHWIER, F. — *Der derzeitige Stand der Herstellung und Verwendung von Neptun Stahl Zur Betenbewehrung*. Felten & Guillaume Rundschau, Heft 31, Seite 167/175, dezencer 1950.
20. A. P. GULYAEV, I. M. LEIKIN, A. A. ROSHCHINA and V. M. UTKIN HIGH — *Strength Steel for reinforcing prestressed concrete structures*. Stahl in English, n.º 10, 1961.
21. DMITRENKO, F. — *Brevets S. N. C. F. & Ing. V. WEINBERG 1946-1947*. Note sur un ouveau procédé de construction en béton précontraint.
22. EVANS, R. H. — *Use of Calcium chloride in Prestressed Concrete*. Proceedings World Conference on Prestressed Concrete, A. 31-1, July, 1957.
23. CHIAVERINI, V. — *Aços-carbono e aços-liga*. ABM, São Paulo, 1959.
24. COLPAERT, H. — *Metalografia, Macrografia e Micrografia dos produtos siderúrgicos comuns*. I. P. T., São Paulo, Boletim n.º 40; Julho de 1951.
25. C. S. B. M. — DEPARTAMENTO DE CONTRÔLE E PESQUISA (Secção de Contrôlo Metalúrgico) — Relatório n.º 861 — *Arame de aço BM-76* — Abril, 1963.
26. C. S. B. M. — DEPARTAMENTO DE CONTRÔLE E PESQUISA (Secção de Contrôlo Metalúrgico) — Relatório n.º 868 — *Ensaio de fluência realizado em arame de aço BEMA 125/140* — Junho, 1963.