Especificações

para

Tubos de Concreto Centrifugado e Armado Sob Tensão Prévia

Eng. Marcello Francisco de Lima

INTRODUÇÃO

Em fins de 1945 recebi do Sr. Eng.º Plínio Penteado Whitaker, Diretor da Repartição de Águas e Esgôtos de São Paulo, a incumbência de formular especificações para tubos de concreto armado destinados a adução de água para a Capital. Foram inicialmente estudadas especificações para tubos de concreto armado sem tensão prévia, sendo abandonado este tipo devido a ser nêle o concreto sujeito a tensões de tração, às quais não se adapta bem o concreto quando destinado a adutoras sob pressão interna e externa.

Foi então elaborada uma especificação para tubos de concreto centrifugado e armado sob tensão prévia. Esta especificação, além de outras exigência, requeria o cálculo das tensões provisórias e finaes nos materiaes de tubo, considerando a deformação lenta e a retração do concreto, e fixava as respectivas taxas. Devido as dificuldades alegadas por interessados em relação aos cálculos, o mesmo Sr. Eng.º Diretor da R.A.E. me incumbiu também de efetuar os cálculos mencionados para verificação da satisfação dessas exigências em material a ser fornecido à R.A.E.. Ao realizar os cálculos, surgiram questões não abrangidas pela especificação, exigindo que fôsse este refundida. Feita a verificação, (incluida na justificação adiante referida) fui ainda encarregado de elaborar as especificações para a nova adutora de S. Amaro, que apresento a seguir.

As características principaes desta especificação são as exigêncas de considerar: — a deformação lenta e a retração do concreto; as sobrecargas externas; as tensões provisórias e permanentes nos materiaes do tubo; a necessidade de evitar a possibilidade de fluência (CREEP) no aço da cinta, a tração permanente na parede do tubo; a necessidade de controlar as tensões durante o processo de fabricação. Esta última exigência é de excepcional importância a vista da variação possível de ocorrer, segundo o método empregado para aplicação da cinta e para a obtenção da tensão prévia.

A justificação das exigências constantes das especificações constituem um estudo que será publicado em número posterior.

REFERÊNCIAS — Tenho a satisfação que valiosos esclarecimentos me foram dados pelo Professor Telemaco van Langendonck, que teve a bondade de lêr este trabalho. Também devo agradecer aos Engenheiros Luiz Augusto Pinto Lima e Jayme Ferreira da Silva, da Secção de Estruturas do I.P.T., Gilberto Molinari, da Secção de Concretos, João Gustavo Haenel e Fernando Alvaro de Toledo Piza da Secção de Metaes, F. I. de Araújo Silva da Secção de Especificações, pelos esclarecimentos e sugestões e ao Eng.º Adriano Marchini, diretor desse Instituto, pelo ascesso às informações.

Devo lembrar os esclarecimentos prestados pelo Engenheiro Afonso de Toledo Piza, relativos à Estatistica.

COMASP
24 NOV 1971
BIBLIOTECA

São Paulo, 21 de maio de 1947.

Ilmo. Snr. Eng.º Plínio Penteado Whitaker
Diretor da Repartição de Águas e Esgotos de São Paulo

Prezado Senhor Diretor

Estou juntando as "Especificações para Tubos de Concreto Centrifugado e Armado, sob Tensão Prévia", para pressão e sobrecargas declaradas, que elaborei em desempenho de suas prezadas ordens. Junto também os cálculos relativos ao tubo projetado para orientar sua redação.

Não havendo especificações das instituições que delas se ocupam, recorri aos conhecimentos existentes sôbre concreto sob tensão prévia, à experiência da nova adutora de Sorocaba, a de um trecho de canalização de duas milhas de extensão e trinta e seis polegadas de diâmetro para pressão de 37 libras por polegada quadrada, construida em Chicago em 1943. Para o cálculo das solicitações originadas pelas cargas de terra e sobrecarga móvel, me vali dos dados Americanos, coligidos e traduzidos para o Alemão por E. Marquardt, e para controlar a fabricação, dos modernos métodos da Estatística. Consultei também duas especificações de origem Americana, de fonte particular, assim como um relatório de ensaios realizados por um laboratório Americano, em tubos de conhecido fabricante Americano, especificações e relatório que me foram apresentados pelos representantes dêsse fabricante e que em data anterior passei às suas mãos. Uma das duas especificações citadas, não traz assinatura nem marca de origem; foi obtida por intermédio do Prof. Telemaco van Langendonck.

Confrontando o resultado calculado da perda máxima de tensão na cinta, no caso presente, com os indicados por Freyssinet, se verifica que o mesmo se acha próximo do máximo previsto por êste autor, e portanto, a julgar por êsses dados, do lado da segurança, pois os 2.500 kg/cm² que encontrei se aproximam mais do máximo de 3.000 kg/cm² do que do mínimo de 1.500 kg/cm², que são os dados de Freyssinet. Os ensaios "Suplementares" previstos nas especificações talvez, venham a justificar o emprêgo de menor taxa de deformação lenta em projetos futuros, permitindo então realizar economia de material.

O número aparentemente grande de tubos a ensaiar para determinar os limites de variação da tensão na cinta (logo após sua colocação) nos ensaios de "taragem" e de "contrôle de fabricação" é justificado num capítulo de meu trabalho preliminar sôbre êste assunto. Note-se que essa variação é função do processo de obter a tensão, assim como da variação do módulo de elasticidade e da espessura do concreto. A

adaptação ao caso presente das fórmulas dadas no Boletim n.º 32 do I. P. T. para determinar a tensão na cinta nos tubos empregados em Sorocaba, ficam a cargo dos engenheiros da Secção de Estruturas dêsse Instituto, que as derivaram.

Após calcular as tensões no tubo empregado em Chicago, admitindo a mesma altura de terra e sobrecarga estática e móvel declarados para o caso presente, com os mesmos coeficientes de segurança e com o mesmo acréscimo de 30 % para atender a sôbre-pressão de enchimento da linha, admitindo as mesmas hipóteses e o mesmo método de cálculo, posso fazer o seguinte confronto:

Discriminação	*São Paulo*	*Chicago*
Máxima tração provisória no concreto, à flexão composta	42 kg/cm².	43 kg/cm².
Tração final no concreto devida à carga permanente + carga móvel, à flexão composta	30 kg/cm².	33 kg/cm².
Compressão final no concreto, devida sòmente às cargas permanentes ..	6 kg/cm².	8 kg/cm².
Máxima perda de tensão na cinta	2500 kg/cm².	2400 kg/cm².
Para reduzir a zero a compressão no concreto logo após a colocação da cinta	3.9 × a pressão de serviço	5.9 × a pressão de serviço
Tração na parede do tubo devida sòmente à pressão interna	32 kg/cm².	18 kg/cm².

Convém notar que êsses resultados incluem os coeficientes de segurança de 1.5 e 1.75 para as cargas estática e móvel respectivamente, e que a pressão de serviço foi acrescida de 30 %, o que aumenta grandemente as tensões de tração e reduz as de compressão, permanecendo a mesma a perda de tensão na cinta.

A conclusão a tirar é que ambos se equivalem quanto às tensões de compressão final permanente, e às trações provisórias. A proteção oferecida pela capa é superior no caso de Chicago, pois a tração na parede não atinge seu limite de resistência.

A vida da cinta e portanto do tubo depende da proteção que possa oferecer a capa. Está previsto que o limite de resistência da capa será ultrapassado quando submetido o tubo à pressão de serviço, quando empregado pouco depois de fabricado, embora não se verifique nela a presença de fissuras. Ensaios realizados em Sorocaba, mais de 6 (seis) meses após a colocação da capa, acusaram tração aparente calculada pela pressão interna, da ordem de 70 kg/cm² na capa, sem que nela fossem observadas fissuras. Tubos ensaiados pela Underwriter's Laboratories Inc. Sponsored by the National Board of Fire Underwriter's, de 207 East Ohio Street, Chigado, um dêles com menos de três meses de idade, sòmente apresentaram fissuras quando a pres-

são interna atingiu 1 1/3 vêzes a pressão de serviço. Calculando a tração correspondente, resulta uma grandeza da ordem acima citada. É claro que as tensões referidas não são reais, pois muito antes de serem atingidas haveria solução de continuidade da argamassa. Processada a deformação lenta do tubo núcleo, a distensão existente na capa é reduzida, melhorando a proteção oferecida à cinta.

No caso de ser o tubo empregado com mais de um ano de idade, a compressão tomada pela capa poderá anular grande parte, talvez tôda a tração devida à pressão interna e sobrecarga permanente e à retração restante, porém à custa de uma redução de compressão no concreto da parede. Não encontrei publicada uma análise que permita a determinação do estado de tensões relativas à pressão interna e às deformações, quando se considere a capa. Não tenho conhecimento de ter sido examinado o estado da capa de tubos que tenham estado em serviço, particularmente com sobrecarga permanente e móvel.

À vista do que foi exposto, se verifica que a garantia que a especificação oferece é baseada nos dados de Freyssinet e no precedente de Chicago quanto à resistência do tubo-núcleo, e nos ensaios de Sorocaba e da Underwriter's Laboratories quanto à proteção que possa oferecer a capa. Sòmente longa experiência poderá dizer a palavra final.

Subscrevo-me, atenciosamente

(a.) *Marcello Francisco de Lima.*

P. S. — Uma revisão dos dados sôbre as concentrações de carga do compressor, e também do coeficiente de impacto da carga móvel (passando de 1.2 para 1.5) altera o quadro das tensões no concreto para:

Discriminação	*São Paulo*	*Chicago*
Máxima tração provisória em flexão composta	34 kg/cm².	36 kg/cm².
Tração final devida a carga permanente + carga móvel, em flexão composta	22 kg/cm².	23 kg/cm².

Os resultados restantes permanecem os mesmos.

ESPECIFICAÇÕES

§ I

a) Definição do tubo:

Entende-se por tal um cilindro de concreto armado circunscrito por um cilindro de aço, reforçado por uma cinta de aço sob tensão prévia, colocada esta sôbre o último, tudo de forma que os diâmetros interno e externo do duplo cilindro possam ser considerados constantes para efeito do cálculo das tensões nos materiais do tubo, materiais estes que por sua vez possam ser considerados como possuindo propriedades mecânicas uniformes em cada tubo, sendo o conjunto protegido externamente por argamassa de cimento e areia.

b) Os tubos terão 1.10 m de diâmetro interno e são destinados a suportar:

1) A pressão de serviço de 65 m de altura dágua e a compressão originada pela cinta.
2) 1.5 m de terra argilosa molhada, acima da geratriz mais alta, pêso próprio do tubo e da água nele contida, calçamento de paralelepípedes comuns.
3) A passagem de um compressor de 16 t de pêso total.
4) Os efeitos da deformação lenta e da retração do concreto.
5) A reação do berço de terra abrangendo o quadrante inferior do tubo.
6) As cargas adiante previstas nos ensaios de pressão interna, compressão diametral e flexão longitudinal.

c) O tubo é composto de três partes, executadas em três operações distintas:

1) O núcleo-tubo de concreto armado e cilindro de aço na sua superfície externa.
2) A cinta de aço.
3) A capa protetora da cinta.

d) Os tubos e peças serão marcados externamente com:

1) Marca da fábrica.
2) Data da fabricação.
3) Pressão de ensaio e de serviço.
4) Número de ordem.

Essas quatro indicações deverão ser permanentes.

Ao laboratório a ser instalado na fábrica serão fornecidas acomodações e mobiliário.

§ II

Os cálculos

As solicitações causadas pelo pêso próprio e da água contida poderão ser calculadas com os coeficientes indicados por E. Marquardt no vol. IV, pág. 453, tabela I do Handbuch für Eisenbetonbau e acrescidas com o coeficiente de segurança de 1.5.

As solicitações originadas pelas cargas de terra e calçamento, poderão ser avaliadas pelo método indicado pelo mesmo autor em seu livro "Beton U. Eisenbetonleitungem" com o coeficiente de segurança por êle indicado, de 1.5 ao fixar a carga equivalente para o ensaio de 2 ou 3 cutelos.

As solicitações devidas à passagem do compressor poderão ser calculadas segundo as indicações do mesmo autor no último livro citado, com o coeficiente de segurança de 1.75 para o ensaio citado.

As tensões originadas pela pressão interna e da cinta considerando a deformação lenta e retração poderão ser calculadas pelas equações dadas por T. van Langendonck, vol. I de "Concreto Armado", § 200, e então, pela tensão restante no concreto, será avaliada a solicitação total que possa produzi-la.

A tensão de tração à flexão composta, resultante do conjunto de solicitações superpostas, poderá ser reduzida à tração simples pelo critério indicado por T. van Langendonck no § 103, nota 160, quando seja essa resultante uma tração que se aproxime do limite de resistência do concreto.

A hipótese de cálculo

1) A parede do tubo é considerada delgada, para determinar tensões originadas pela cinta, pela pressão interna e pelas deformações (lenta e de retração) do concreto.
2) A capa de proteção do aço não é considerada.
3) O cilindro de aço não é considerado.
4) A cinta será considerada aderente ao cilindro de aço e êste ao tubo de concreto.
5) É admissível o princípio da superposição das tensões. No caso de serem estas reduzidas a tração simples, será necessário considerar a variação do módulo de elasticidade na secção.
6) Três quartos da deformação originada pela retração é recuperada depois de se achar o concreto em contacto com a água.

AS CONDIÇÕES MAIS DESFAVORÁVEIS A PREVER

a) *Tensão provisória de compressão no concreto e sua avaliação* — Quando o tubo é empregado pouco tempo depois de fabricado; antes da deformação lenta e depois da reversão da retração, quando o tubo estiver vazio e quando tôdas as sobrecargas (estática e móvel) agirem sôbre o tubo:

1) Será empregada a taxa menor de retração adiante fixada.
2) Será empregado o limite superior de tensão na cinta determinado nos ensaios de taragem da tensão da cinta adiante previstos.
3) Será empregada a máxima tensão de compressão (originada pela flexão transversal) dentre as calculadas no vértice, imposta e soleira do tubo, quando são aplicadas tôdas as sobrecargas ao mesmo tempo, empregando n = 8.
4) É admitido que a tensão referida em (3) seja calculada sem os coeficientes de segurança das sobrecargas externas (estática e móvel).

b) *Tensão provisória na cinta* — Tensão prévia antes da deformação imediata do concreto, calculada com o limite superior de tensão na cinta.

c) *Tensão permanente na cinta* — Quando o tubo é empregado pouco tempo depois de fabricado, depois da deformação lenta, depois da reversão da retração, quando se achar o tubo sob pressão de serviço, quando as sobrecargas permanentes são aplicadas:

1) Será empregada a taxa menor de retração, e o limite superior citado em (b).
2) Será empregada a taxa menor de deformação lenta adiante declarada.
3) Será empregada a tensão de tração correspondente à que foi encontrada no concreto, na imposta, quando são aplicadas as sobrecargas permanentes.

d) *Tensão provisória de tração no concreto* — Quando o tubo é empregado longo tempo depois de fabricado, depois de ocorrer a deformação lenta originada pela pressão da cinta, antes da deformação lenta devida às sobrecargas permanentes e antes da reversão da retração, quando tôdas as cargas são aplicadas, estando o tubo sob pressão de serviço:

1) Será empregada a taxa maior de retração.
2) Será empregada a taxa maior de deformação lenta.
3) Será empregado o limite intefior de tensão na cinta determinado nos ensaios de taragem já citados.
4) Será empregada a máxima tensão de tração originada pela flexão transversal, das que forem calculadas no vértice, imposta e soleira, originadas pelas sobrecargas permanentes.
5) Idem, para a sobrecarga móvel.

e) *Tensão permanente no concreto* — Quando as condições são as da letra (d) acima ,porém após a reversão da retração e sem a carga móvel.

f) *Tensão provisória (compressão) na armadura tangencial interna* — Quando o tubo é empregado longo tempo depois de fabricado, depois da deformação lenta, antes da reversão da retração e sem pressão interna:

1) Será empregada a maior taxa de retração e de deformação lenta.
2) Será empregado o limite superior de tensão na cinta determinado, baseado nos ensaios de taragem.

g) *Tensão permanente na armadura tangencial interna* — Quando as condições são as indicadas em (f), porém depois da reversão da retração e com a pressão interna.

§ III

1) Espessura mínima da parede do tubo-núcleo = 9.5 cm. Espessura fixada no cilindro de aço = chapa n.º 26 U.S.G. Armadura longitudinal = 0,4 % da secção de concreto.
2) A armadura tangencial interna sòmente será empregada se fôr justificada sua necessidade como auxiliar construtivo.
3) As cargas originadas pelo pêso próprio do tubo, água contida, da terra, e da sobrecarga móvel conterá um fator de segurança de 1.5. A sobrecarga móvel conterá um fator de segurança de 1.75, excluído o coeficiente de impacto, que será de 1.5.
4) "Limite de proporcionalidade" é definido no Boletim n.º 2 do antigo Laboratório de Resistência de Materiais da Escola Politécnica de São Paulo, hoje Instituto de Pesquisas Tecnológicas.
5) O aço da cinta será de procedência conhecida e sua composição química e tratamento térmico serão declarados.
6) O módulo de elasticidade do concreto será determinado nos tubos ensaiados ao ser feita a taragem do processo de obter a tensão na cinta. Se necessário, o valor de "n" empregado ao projetar o tubo será modificado para conformar-se com os resultados obtidos.
7) A pressão de serviço de 65 m de altura dágua já inclui um coeficiente de segurança de 1.30 para prever sobrepressão ao ser colocada a linha em carga.

§ IV

O Aço da Cinta — Taxas de Trabalho

a) Será empregado arame de aço puxado a frio e de alta resistência, de diâmetro não inferior a 1/8 de polegada.
b) O limite de resistência será no mínimo igual a 1,8 vêzes o limite de proporcionalidade.
c) Deverá satisfazer às exigências da A.S.T.M., designação A 229-41 quanto aos ensaios de enrolamento ao caráter da fratura e a tolerância relativa à variação do diâmetro.

d) A máxima tensão provisória indicada na letra (b) do § II, não excederá o limite de proporcionalidade do aço.
e) A tensão permanente indicada na letra (c) do § II, não excederá 0.4 do limite de resistência do aço.
f) O módulo de elasticidade será tomado = 2.1×10^6 kg/cm².
g) O teor em fósforo e enxofre não será superior ao indicado para o aço da designação A-229-41 da A.S.T.M.
h) O limite mínimo de resistência se conformará com aqueles da designação citada, podendo ser superior a êles.
i) No caso de ser o limite de proporcionalidade determinado pouco depois de sujeito o aço a uma tensão momentânea igual ao limite superior de tensão previsto na cinta (*antes* da deformação imediata do concreto), a letra (d) dêste parágrafo passará a ser: "O limite superior de tensão na cinta, *depois* da deformação imediata do concreto, não excederá o limite de proporcionalidade do aço.

§ V

I

O Aço da Armadura do Núcleo

a) Especificação da A.B.N.T., designação EB_3, desde que o aço tenha limite de escoamento real.
b) A tensão provisória indicada na letra (f) do § II não excederá 0.8 do limite de escoamento do aço.
c) A tensão permanente indicada na letra (g) do § II não excederá 0.4 do limite de resistência nem de 0.625 do limite de escoamento do aço.
d) A tensão prévia na armadura longitudinal não excederá de 0.8 do limite mínimo de escoamento.

A tensão permanente depois das deformações calculadas com as taxas de $\frac{10}{3} \times 10^{-6}$ cm²/kg para deformação lenta e 100×10^{-6} cm/cm, para retração, não excederá de 0.4 do limite mínimo de escoamento.

e) No caso de ser empregado aço classificado OO-CA, deverão ser apresentados comprovantes do limite mínimo de escoamento e de resistência e de alongamento mínimo de ruptura, e diagrama tensão deformação na escala de 1 mm = 40 kg/cm². e o mm = $\frac{1}{50.000}$ cm/cm para tensão unitária e deformação unitária, respectivamente.
f) No caso de ser empregado aço que não tem limite real de escoamento, deverá obedecer à letra (c) do § IV, e as taxas de trabalho não excederão o limite de proporcionalidade para tensões provisórias, nem a 0.4 do limite de resistência para as tensões permanentes.

II

O Aço dos Anéis e da Bolsa

Deverá ser produzido pelo processo ("open hearth") e ao mesmo tempo se adaptar ao tipo de solda empregado, e terá limite de escoamento não inferior a 2400 kg/cm².

III

O aço do cilindro se conformaria com as exigências da A.S.M.T., designação A-78-40, para "Chapas de baixo teor de carbono e baixo limite de resistência, classe B, para solda", porém com limite de escoamento mínimo de 2100 kg/cm².

§ VI

O Concreto do Núcleo e as Taxas de Trabalho

a) Especificações da A.B.N.T., designação EB_1, EB_2, EB_4.
b) O agregado graúdo não terá graduação superior a 19 mm.
c) O consumo de cimento será de 500 kg/cm³ de concreto.
d) A resistência dos corpos de prova cilíndricos não será inferior a 250 kg/cm² aos 28 dias de idade.
e) A compressão no concreto logo após a aplicação da cinta não excederá de 60 % da resistência acusada pelos corpos de prova cilíndricos (cura e idade igual à dos tubos por ocasião da cintagem), nem a compressão provisória citada na letra (a) § II excederá a 60 % da resistência aos 28 dias de idade.
f) A água empregada será isenta de óleos, ácidos, alcalis e de matéria orgânica.
g) Será empregada areia natural.
h) A resistência do concreto centrifugado à tração simples não será inferior a 21 kg/cm² aos 28 dias de idade.
i) A tração provisória citada no § II, letra (d), não excederá de 21 kg/cm² à tração simples.
j) Para projetar o tubo, o módulo de elasticidade será tomado = 262500 kg/cm²; as taxas de retração = $\begin{cases} (400 \times 10^{-6} \\ (100 \times 10^{-6} \end{cases}$ antes e depois da sua reversão, respectivamente; as taxas de deformação lenta = $\begin{cases} (10 \times 10^{-6}\ cm^2/kg \\ (10/3 \times 10^{-6}\ cm^2/kg \end{cases}$ ao ar livre e em ambiente úmido respectivamente.
k) A tensão permanente será uma compressão quando calculada na letra (e) do § II.
l) O fator 2 será empregado para transformar o limite de resistência à flexão simples em limite de resistência à tração simples.
m) A tração provisória referida na letra (i) não excederá de 42 kg/cm² em flexão composta.

§ VII

Argamassa da Capa Protetora da Cinta

a) Será de cimento e areia, segundo as especificações da A.B.N.T. designação EB_1 EB_2 EB_4.
b) O consumo de cimento será de 450 kg/m³ de argamassa.
c) Os corpos de prova cilíndricos terão resistência superior a 250 kg/cm² aos 28 dias de idade.
d) A graduação da areia será sujeita à especificação da American Railway Engineers Association (A.R.E.A.) para o emprêgo de "cement gun".
e) A água será isenta de óleos, ácidos, alcalis e substâncias orgânicas.

§ VIII

Juntas

Deverão ser estanques quando ensaiadas ao dôbro da pressão de serviço; não apresentarão gotas, pontos permeáveis, saída dágua, trincas.

Deverão ser estanques sob as condições normais de serviço, inclusive expansão, contração e recalque do terreno.

Serão de ponta e bolsa, vedação por meio de aro de borracha de composição especial que assegure estanqueidade permanente, disposto de forma a não suportar o pêso do tubo.

Peças Especiais

Peças especiais como cotoveles, tês, ligações, aberturas para inspeção, para ventosas, para descargas, do mesmo tipo dos tubos e da mesma resistência dêstes poderão ser fornecidos, assim como ligações para união a outros tipos de tubos.

§ IX

I — *Do Tubo-Núcleo*

a) *Aglomerantes* — Será empregada a composição granulométrica adequada à obtenção da máxima resistência do concreto. As misturas serão preparadas mecânicamente.

b) *Armadura* — As ligações serão feitas por meio de solda elétrica. A proteção não será inferior a 15 mm. Sua posição e forma serão asseguradas durante a fabricação.

c) As formas serão estanques, rígidas, sem vibração nociva ao girar, com dispositivo nos cabeçotes para a distensão da armadura longitudinal.

d) *Cura* — Os tubos serão colocados ainda com suas formas em câmara de vapor saturado, onde permanecerão durante 6 horas no mínimo. Ao serem retirados da câmara, serão resguardados contra correntes de ar até esfriarem. Serão umidecidos até a ocasião da aplicação da cinta, o que não será feito antes de 3 dias de cura.

II — *Do Cilindro de Aço*

As juntas longitudinais das chapas serão soldadas por processo elétrico adequado. Não haverá juntas na secção reta, a não ser as de ligação aos anéis ou às luvas da ponta e da bolsa, soldadas por processo elétrico adequado. O cilindro ligado às peças das extremidades será sujeito à pressão hidráulica até elevar a tensão na parede do cilindro a 1700 kg/cm², sujeitando à prova tôdas as juntas.

Se houver vazamento, será êle reparado e repetido o ensaio.

III — *Da Cintagem*

a) O processo de aplicação da cinta deverá assegurar a permanência das tensões dentro dos limites previstos no projeto do tubo (a serem verificados nos ensaios de taragem e de contrôle), assim como o espaçamento uniforme das espiras, que não excederá de 3 cm centro a centro do arame.

b) Especial cuidado será tomado para evitar tensões baixas nas extremidades do tubo.

c) As extremidades da espiral devem ser sòlidamente fixadas ao tubo.

IV — *Da Capa Protetora da Cinta*

a) A capa protetora terá espessura de 20 mm.

b) As misturas serão preparadas mecânicamente.

c) A argamassa será projetada sôbre a superfície externa do tubo por meio de ar comprimido.

d) A superfície da capa será lisa, isenta de trincas a não ser aquelas em forma de teia de aranha, que são toleradas.

e) O tubo será umidecido até a aplicação da capa.

f) *A Cura* — Durante 24 horas no mínimo, os tubos permanecerão em recinto coberto, protegidos contra correntes de ar, e em atmosfera saturada de água. Em seguida, poderão ser transportados para o ar livre, onde permanecerão sob chuveiro durante 10 dias.

g) A face externa da bolsa será protegida pela capa de cimento e areia igual à do tubo.

§ X

Acabamento do Núcleo

FORMA

O tubo acabado deve satisfazer ao gabarito e às medidas. A superfície interna deve ser lisa. As extremidades dever ter arestas vivas e tôpos perpendiculares ao eixo.

CONSTITUIÇÃO

a) O tubo deve ser isento de defeitos que prejudiquem seu valor prático — a resistência à pressão interna e externa, a impermeabilidade e a durabilidade.

b) Trincas superficiais em forma de teia de aranha não prejudicam.

c) Os tubos rejeitados devem ser marcados, separados dos bons, e retirados para local a êles destinado.

MEDIDAS

a) O diâmetro interno não deverá ser inferior a 99 % do diâmetro nominal.

b) A tolerância para variação da espessura da parede é de 3 % da espessura nominal, não devendo ser excedida em ponto algum da parede.

c) A tolerância para variação do comprimento útil é de 1 % da medida nominal.

d) A parede interna não deverá divergir da reta em mais de 5 mm por metro de comprimento do tubo.

e) A posição da armadura não deverá divergir de sua posição nominal mais de 15 mm.

f) Os tubos que não satisfizerem, poderão ser retocados, com o assentimento do comprador ou de seu representante.

§ XI

TARAGEM DO PROCESSO DE APLICAÇÃO DA CINTA

A taragem consiste na avaliação dos limites de variação da tensão na cinta, a esperar numa partida composta de grande número de tubos.

A taragem é feita em três passos:

1) Ensaios para determinar as tensões na cinta de cada tubo, *numa amostra* de 30 tubos.
2) Classificação do tipo de distribuição das tensões na amostra em um dos dois tipos de distribuição conhecidos por Camp-Meidle e Tchebycheff.
3) Avaliação por meio dos métodos da Estatística, dos limites de variação na partida, sujeitos à condição de se acharem aproximadamente 90 % dos tubos da partida dentro dêsse limites.

a) O primeiro se caracteriza por uma curva de frequências sem arestas, unimodal (um único centro de variação), e a média aproximadamente coincidente com o valor mais frequente. Não há restrições quanto à forma do universo estatístico do segundo tipo.

b) Os limites de tensões referidos em (3) são definidos pelo valor da média ± 2.1 vêzes o desvio padrão no caso do primeiro tipo de distribuição e pelo valor da média ± 3.2 vêzes o desvio padrão no caso do segundo tipo.

c) Para determinar o desvio padrão e a média, as 120 observações serão divididas em sub-grupos de 5 observações, tomadas na ordem em que foram cintados os tubos.

Ensaios para determinar as tensões

Êstes ensaios serão realizados pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo, pelo mesmo método empregado no Certificado n.º 43.788 ou no Boletim n.º 32 dêsse Instituto, exceto quanto à colocação dos tensômetros. Serão colocados quatro dêstes em cada diretriz a observar, afastados 45º entre si. Serão feitas observações em quatro diretrizes igualmente espaçadas entre si, deixando espaço de cêrca de 25 cm nas extremidades do tubo. Os tensômetros serão mantidos aproximadamente nas mesmas posições, tanto no ensaio para determinar a deformação unitária originada pela pressão interna unitária, como no ensaio para determinar a deformação unitária devida à retirada da cinta. Os tensômetros poderão ser colocados sôbre o cilindro de aço.

O cálculo das tensões obedecerá às mesmas hipóteses admitidas no referido certificado, podendo-se empregar as mesmas fórmulas, adaptadas a êste tipo de tubo.

Será determinada a tensão em cada diretriz observada.

Os 30 tubos a ensaiar serão iguais ou semelhantes aos tubos a fabricar, o aço empregado será o mesmo aço a empregar na fabricação, as tensões empregadas no aço serão as mesmas tensões a empregar na fabricação.

Os tubos serão umidecidos durante 8 dias anteriores à cintagem, e depois desta até a ocasião do ensaio, que será realizado dentro do prazo de cinco dias contados da data da cintagem.

Caso os limites de tensão admitidos no projeto sejam excedidos, será êste refeito com os novos limites, de forma que as tensões nos materiais não excedam as taxas admitidas.

§ XII

Medidas

Dados que deverão ser apresentados:

a) espessura da parede do tubo-núcleo e tolerância;
b) espessura mínima da camada de proteção da cinta;
c) espessura do cilindro de aço;
d) diâmetro interno e externo do tubo;
e) desenho detalhado da junta, com indicação escrita das dimensões dos detalhes;
f) comprimento útil do tubo;
g) pêso do tubo;
h) armadura do núcleo-espiras/m linear, seu diâmetro; número de geratrizes e seu diâmetro;
i) cinta-número de espiras/m linear e seu diâmetro.

§ XIII

Ensaios de Contrôle de Fabricação dos Tubos

(Retirada de amostras e ensaios pelo Instituto de Pesquisas Tecnológicas do Estado de São Paulo)

1) *Do Aço da Cinta:*

De cada quatro toneladas de aço ou fração será retirada uma amostra, e determinado o limite de proporcionalidade e de resistência, e executado o ensaio de enrolamento, verificado o diâmetro e caracterizada a fratura, para confronto com as exigências das letras (a), (b) e (c) do § IV desta Especificação.

No caso de ser empregado calor para obter a tensão prévia, poderão ser ensaiadas e julgadas amostras das cintas dos tubos ensaiados no n.º 7 do § XIII.

Julgamento — Segundo as normas da A.B.N.T., designação EB_3, substituindo-se a palavra "barra" por rôlo.

2) *Do Aço do Núcleo:*

Retirada de amostras, ensaios e julgamento segundo as normas da A.B.N.T., designação EB_8.

3) *Do Aço dos Anéis e da Bolsa:*

Será apresentado comprovante relativo ao processo de fabricação do aço referido no § V. Ensaios e julgamento segundo as normas da A.B.N.T., designação EB_3.

4) *Emendas na Cinta:*

Não serão admtidas emendas na cinta.

5) *Do Concreto do Núcleo:*

a) Serão feitos diàriamente seis ou mais corpos de prova cilíndricos, dos quais a metade será sujeita ao mesmo processo de cura que os tubos, e ensaiados com a idade dêstes por ocasião da cintagem, e a outra metade aos 28 dias de idade. Os ensaios seguirão as normas da A.B.N.T., e os resultados serão confrontados com as letras (d) e (e) do § VI; em caso de discordância, o trabalho não prosseguirá sem que seja ela eliminada.

b) *No início da fabricação* serão ensaiados três ou mais segmentos de tubos de concreto simples à pressão interna, e determinada a resistência do concreto à tração, aos 28 dias de idade. Poderão em lugar dos segmentos, ser ensaiados prismas de concreto centrifugado à flexão. Os resultados serão confrontados com a letra (h) do § VI.

Os ensaios de prismas poderão ser repetidos durante a fabricação. Em caso de discordância, será ela eliminada antes de prosseguir o trabalho.

6) *Da Capa de Proteção da Cinta:*

Diàriamente serão feitos corpos de prova pequenos para ensaio aos 3, 7 e 28 dias e confrontados os resultados com a letra (c) do § VII.

O fator água-cimento e a consistência serão determinados diàriamente. Em caso de dsicordância, as providências já indicadas serão tomadas.

7) *Da Tensão na Cinta:*

Verificação da tensão no aço da cinta:

a) Do primeiro lote de 500 tubos serão retirados e ensaiados trinta tubos. A retirada será feita na proporção em que forem sendo fabricados, e o ensaio será realizado dentro do prazo de cinco dias da data da cintagem, sendo a amostra umidecida até a ocasião do ensaio. Serão determinados os limites de variação como no ensaio de taragem. Caso os limites agora determinados excedam os que foram empregados para dimensionar o tubo, será êste redimensionado com os novos limites, de forma que as taxas de trabalho não sejam excedidas.

b) Dos tubos restantes para completar o fornecimento serão retirados e ensaiados trinta tubos, dentro do prazo de cinco dias da data da cintagem, sendo a amostra umidecida até a ocasião do ensaio. Os resultados dos ensaios serão considerados em grupos de cinco tubos, na ordem em que foram cintados. Das tensões determinadas nas vinte diretrizes de cada grupo serão notadas as tensões extremas. Se antes de serem ensaiados seis grupos fôr constatado que há um grupo no qual quatro ou mais tensões excedam os limites empregados para calcular as tensões nos materiais do tubo, será suspensa a cintagem, feita nova taragem e redimensionado o tubo com os novos limites oriundos desta taragem, de forma que as taxas de trabalho não sejam excedidas. A cinta dos tubos ainda sem capa de proteção será retirada. Prosseguirá então a cintagem, repetindo o processo das letras (a) e (b) nos tubos ainda por cintar.

As tensões serão determinadas pelo método indicado no parágrafo XI para taragem.

c) A média de cada grupo de 5 observações nas amostras referidas em (b) não excederá os limites fixados pela média das médias dos 24 grupos de 5 ± *1.60* × (a média dos desvios padrão dos 24 grupos).

Se antes de serem ensaiados os 30 tubos aparecerem 5 grupos que não satisfaçam essa condição, serão tomadas as providências indicadas em (b).

O desvio padrão de cada grupo de 5 observações nas amostras referidas em (b) não excederá a média dos desvios padrão dos 24 grupos de 5 ± 1.127 × (a média dos desvios padrão dos 24 grupos).

Se antes de serem ensaiados os 30 tubos, aparecerem 5 grupos que não satisfaçam essa condição, serão tomadas as providências indicadas em (b).

§ XIV

1) *Ensaio de resistência à pressão interna:*

a) Até dois por cento dos tubos fabricados poderão ser ensaiados logo depois de colocada a cinta, sem a capa, sob pressão calculada para reduzir a zero a compressão no concreto com a tensão na cinta em seu limite inferior; considerando sòmente a solicitação da pressão interna e da cinta.

Tensômetros colocados sôbre o tubo não deverão acusar deformações indicadoras de ruptura do concreto, a superfície interna não deverá apresentar fissuras.

b) Três tubos conservados em meio úmido por dentro e por fora ensaiados com a capa, após 28 dias de colocação desta, serão levados a ruptura.

Serão observados: — A pressão a que ocorre a primeira fissura na capa e a primeira fissura de 0.254 mm; a pressão de ruptura do concreto; as deformações acusadas por tensômetros colocados sôbre o cilindro de aço, e as pressões correspondentes; a pressão de ruptura do cilindro de aço ou da cinta.

c) Três tubos serão reservados para ensaios semelhantes ao anterior, decorrido um ano de sua fabricação. Êstes tubos serão primeiramente ensaiados aos 28 dias de idade, notadas as pressões relativas ao aparecimento da primeira fissura e da primeira fissura de 0.254 mm, retirada a pressão, e protegida a região das fissuras. Serão novamente ensaiados decorrido um ano, notando-se a pressão a que as fissuras já observadas atingem a abertura de 0.254 mm, e levado a ruptura, observando-se tudo como em (b).

Êste ensaio e o da letra (b) têm apenas objetivo de esclarecer o efeito da retração e da deformação lenta.

2) *Ensaio de compressão diametral:*

a) Três segmentos cortados de tubos diversos serão ensaiados à ruptura, com a capa, segundo o método MB-18 da A.B.N.T. Êsses tubos serão prèviamente sujeitos à pressão interna de serviço. Antes de fazer o corte, a cinta será ancorada em pontos próximos dos mesmos.

Deverão suportar carga calculada, para reduzir a zero a compressão no concreto (no lado interno da soleira) com a tensão na cinta no seu limite inferior, compressão essa referente sòmente às solicitações da cinta e da pressão interna de serviço.

Os tubos ou segmentos serão umidecidos interna e externamente até a ocasião do ensaio, que não será feito antes de completarem 28 dias de idade.

b) Os segmentos restantes serão reservados para ensaio semelhante depois de decorrido um ano do ensaio (a).

O objetivo do ensaio da letra (b) é apenas esclarecedor.

3) *Ensaio de flexão longitudinal:*

Um tubo será ensaiado quando colocado sôbre dois apoios separados entre si 60 % do comprimento útil do tubo. A carga uniformemente distribuída será elevada até alcançar 7 t/m.

Não deverá ocorrer ruptura ao longo das diretrizes. A ruptura poderá ser acusada por tensômetros colocados ao longo da geratriz inferior.

4) *Ensaio de recebimento da linha:*

Sob pressão de serviço, a perda não excederá de $\frac{1}{1000}$ de água contida no trecho ensaiado, em 24 horas.

5) *Ensaios suplementares:*

Trinta tubos serão reservados para determinação de tensão na cinta depois de decorrido um ano de sua fabricação. Êstes tubos terão a cinta coberta por camada de cimento e areia apenas o suficiente para cobrir o aço. Depois de ensaiados, o fabricante recolocará a cinta e sua capa normal. Serão retiradas as amostras paralelamente às amostras destinadas aos ensaios de verificação das tensões na cinta (§ XIII).

Êstes ensaios têm apenas objetivo elucidativo.

§ XV

Estas especificações poderão ser modificadas por acôrdo mútuo, sempre por escrito.

São Paulo, 9 de maio de 1947.

(a.) *Marcelo Francisco de Lima.*

PROJETO DE TUBO

Dados:

p = pressão interna = 50 (1 + 0.30) = 65 m de água.
Altura de terra acima da geratriz mais alta = 1.50 m.
Calçamento de paralelepípedes de 0.15 m de altura.
Sobrecarga móvel = compressor de 16 t.
Diâmetro interno = 1.10 m.
Diâmetro externo do tubo-núcleo = 1.29 m.

S_c = secção da capa por cm 1 de tubo = 2.00 cm².
S'_c = secção de concreto por cm 1 de tubo = 9.50 cm².
S_a = secção da cinta por cm 1 de tubo = 0.216 cm².
S_f = secção do cilindro por cm 1 de tubo = 0.0475 cm².
$S''_c = S'_c + S_c$ = 11.5 cm² por cm 1 de tubo.

$$\mu' = \frac{S_c}{S'_c} = 0.005.$$

$$\mu''_t = \frac{S_a + S_f}{S'_c + S_c} = \frac{0.265}{11.5} = 0.0339.$$

$$\mu'_t = \frac{S_a + (S_f = 0)}{S'_c} = \frac{0.216}{9.5} = 0.0227;$$ toma outros valores quando seja considerado o efeito da capa sôbre a deformação lenta, e quando se conta com o cilindro de aço.

δ_t = taxa de deformação lenta $\begin{cases} \text{ao ar livre} = 10 \times 10^{-6}\ \text{cm}^2/\text{kg}. \\ \text{nágua} = 10/3 \times 10^{-6}\ \text{cm}^2/\text{kg}. \end{cases}$
E_f = módulo de elasticidade do aço = 2.1×10^{-6} kg/cm². v
E_c = módulo de elasticidade do concreto = $262{,}5 \times 10^{-3}$ kg/cm².

$$n = \frac{E_f}{E_c}$$

σ'_a = tensão na cinta logo após a deformação imediata = = 5500 kg/cm².

AS CARGAS EXTERNAS

Terra (segundo Marston):

$G_e = C\ Y\ B^2$ (vêr Beton v. Eisenbetonleitungen por E. Marquadt, p. 18), onde

Y = pêso específico aparente da terra = 2 t/m³.

B = diâmetro externo do tubo = (1.29 + 0.04 da capa) = 1.33 m.

C = coeficiente da tabel I, p. 18, para a proporção

$$(H/B = \frac{1.50}{1.33} = 1.13) = 0.961$$

onde H = altura de terra acima da geratriz mais alta do tubo.

O valor acima, 0,961 foi interpolado, para o caso mais desfavorável de argila molhada (não saturada)

$$G_e = 0.961 \times 2 \times (1.33)^2 = 3.4\ t/m.$$ de geratriz

Esta será a carga para apôio comum, no caso de não atingir a largura da vala (1.35 B = 1.80 m).

Vêr fig. 14, p. 24 (*Benton u. Eisenbetonleitungen*) para achar o fator 1.35, com r_{sd} = 0,70, que é o valor aconselhado na pág. 26 para argila, e terreno de apôio firme.

Aplicando o "fator de correção" para ensaio de 2 ou 3 cutelos, a carga será = 3.4/1.5 = 2.3 t/m.

Largura de Vala > 1.80 m

O tubo é agora calculado como tubo sob atêrro. Tomando r_{sd} = 0.70 (vêr pág. 26) e "a" = 0.70 = relação da saliência do tubo acima do tereno de apôio do atêrro para o diâmetro; $r_{sd} \times a = 0.70 \times 0.70 = 0.49 \approx 0.50$.

Entrando no diagrama da fig. 11 para tubos pétreos, com

$$\frac{H}{B_1} = \frac{1.50}{1.33} = 1.113, \text{ acha-se}$$

C_d = 1.4 a empregar na fórmula para achar a carga G

Sobrecarga móvel: *

$$G = C_d \text{ y } B^2_1 = 1.4 \times 2 \times (1.33)^2 = 5.0\, t/m \text{ de geratriz}$$

Aplicando agora o fator de segurança 1.5, o "fator de correção" 1.5 relativo a apôio sôbre um ou dois cutelos, e ainda o fator de redução de carga; êste último tirado do diagrama n.º 51, p. 68, entrando com os valores de $\frac{H}{B_1}$ = 1.13 e a = 0.70, êste fator = 2.02 (para apôio comum).

Então, a carga equivlaente para ensaio de 2 ou 3 cutelos =

$$= \frac{5.0 \times 1.5}{1.5 \times 2.02} = 2.5\, t/m$$

No diagrama n.º 26 de p. 39, entrando com os valores de B_1 = 1.33 e altura H = 1.50 m, obtem-se o valor 21 % = % da carga que atinge um tubo de 0.91/c de comprimento.

A carga prevista é um compressor de 16 t; então, a carga que atinge o tubo é $\frac{16 \times 0.7}{0.91} \times 0.21$ = 2,6 t/m de tubo. Onde 0.7 é a parte da carga concentrada no eixo trazeiro.

Aplicando um coeficiente de impacto de 1.2, um fator de segurança de 1.75 e o fator de correção de 1.5 para ensaio de 2 ou 3 cutelos.

$$\text{A carga será} = \frac{2.6 \times 1.2 \times 1.75}{1.5} = 3.6\, t/m$$

(*) = Vêr correção na última página (33) — numeração dactilografada.

Sobrecarga Estática:

Paralelepípedos de 0.15 m de altura colocados sôbre o atêrro da vala. A camada de areia usual pode substituir igual espessura de terra.

(Ver eq. 14, p. 38) $G_g = C_s B_g \times g$, onde C_s é um coeficiente tirado da tabela 8, p. 33, B_g é a largura da vala, e g é a carga estát.ca por m².

A carga que atinge o tubo será:

$$G_g = 0.85 \times 2.33 \times 0.15 \times 2.5 = 0.74\,t/m$$

onde 2.33 é a largura da vala com 0.5 m de cada lado do tubo.

Aplicando o fator de correção, e o fator de segurança 1.5, a carga para o ensaio de 2 ou 3 cutelos será:

$$G_g = \frac{0.74 \times 1.5}{1.5} = 0.74\,t/m$$

O total da carga equivalente para o ensaio de 2 ou 3 cutelos será:

$$2.5 + 3.6 + 0.74 = 6.84 \sim 6.9\,t/m$$

Notar que há um fator de segurança de 1.5 na 1.ª carga e de 1.75 na 2.ª, e que foi admitido 0.5 m de espaço de cada lado do tubo.

AS SOLICITAÇÕES NA PAREDE DO TUBO

Cargas:

1) Pêso próprio do tubo.
2) Pêso da água contida, com o tubo inteiramente cheio.
3) Sobrecarga de água (pressão interna) e da pressão da cinta.
4) Carga da terra + sobrecarga móvel + sobrecarga estática.

As solicitações resultantes das cargas 1 e 2 serão calculadas com os coeficientes da tabela I, p. 453 do Handbuch für Eisenbetonbau, vol. IV, onde o tubo é considerado apoiado sôbre o quadrante inferior. São chamadas "segundo Marquardt", porque o capítulo refente a essa tabela foi por êle escrito.

SOLICITAÇÕES SEGUNDO MARQUARDT

λ = 0.25 = coeficiente de pressão da terra.

t = 2.14 m = altura de terra acima do centro do tubo.

Y_e = 2 t/m³ pêso específico aparente da terra.

g = 0.115 × 1.0 × 2.4 = 0.276 t/m² = pêso de 1 m² de parede de 0.115 m de espessura.

Y_w = pêso específico da água.

Y_s = pêso específico da terra = Y_e neste caso.

r = 0.6075 m = raio médio do tubo.

Convenção sôbre os sinais:

Os momentos positivos são os que tendem a aumentar o raio de curvatura do tubo.

Solicitações normais positivas são as de compressão.

Carga (1) = Pêso próprio.

Vértice:

$M = +0.344\,gr^2 = +0.344 \times 0.276 \times 0.368 = +0.0348$ mt/m de geratriz

$N = -0.166\,gr = -0.166 \times 0.276 \times 0.6075 = -0.0278$ t/m

Imposta:

$M = -0.3927\,gr^2 = -0.3927 \times 0.276 \times 0.368 = -0.0395$

$N = +1.5708\,gr = +1.5701 \times 0.276 \times 0.6075 = +0.264$

Soleira:

$M = +0.4406\,gr^2 = +0.4406 \times 0.276 \times 0.368 = +0.0447$

$N = +0.1666\,gr = +0.1666 \times 0.276 \times 0.6075 = +0.0278$

Carga (2) = Água até ao vértice.

Vértice:

$M = +0.1724\ y\ w\ r^3 = +0.1724 \times 1 \times 0.224 = +0.0385$

$N = -0.5833\ y\ w\ r^2 = -0.5833 \times 1 \times 0.368 = -0.215$

Imposta:

$M = -0.1964\ y\ w\ r^3 = -0.1964 \times 1 \times 0.224 = -0.0440$

$N = -0.2146\ y\ w\ r^2 = -0.2146 \times 1 \times 0.368 = -0.0790$

Soleira:

$M = +0.2203\ y\ w\ r^3 = +0.2203 \times 1 \times 0.224 = +0.0494$

$N = -1.4167\ y\ w\ r^2 = -1.4167 \times 1 \times 0.368 = -0.521$

Resumo das Solicitações (Cargas (1) e (2) em mt e t)

Carga n.º	*Vértice*		*Imposta*		*Soleira*	
	M	N	M	N	M	N
1	+ 0.0348	− 0.0278	− 0.0395	+ 0.2640	+ 0.0447	+ 0.0278
2	+ 0.0385	− 0.215	− 0.0440	− 0.0790	+ 0.0494	− 0.5210
Σ	+ 0.0733	− 0.2428	− 0.0835	+ 0.1850	+ 0.0941	− 0.4932
1.5(*) × Σ	+ 0.110	− 0.364	- 0.125	+ 0.278	+ 0.141	− 0.740

Nota — A convenção de sinais é:
Momento positivo quando o raio tende a aumentar.
Solicitação normal positiva é de compressão.

(*) = Fator de segurança.

Carga (4) = Terra + Carga Móvel + Carga Estática

A carga equivalente para o ensaio de 2 ou 3 cutelos já foi calculada = 6.9 t/m de geratriz

Da pág. 438 do Handbuch für Eisenbetonbau

$$M = -P\rho \left(\frac{\operatorname{sen}\varphi}{2} - \frac{1}{\pi}\right)$$

$$N = \frac{p}{2} \operatorname{sen}\varphi, \text{ onde:}$$

φ = ângulo que faz a secção radial em apreço com o diâmetro vertical, a partir do vértice.

ρ = raio médio de curvatura.

P = carga aplicada sôbre a geratriz.

$M\varphi$ = momento fletor na secção determinada por ϕ.

$N\varphi$ = solicitação normal à secção considerada.

Vértice:

$$M_o = -6.9 \times 0.6075 \left(0 - \frac{1}{\pi} = -0.318\right) = +1.33 \text{ mt/m de geratriz}$$

$$N_o = 6.9/2 \times 0 = 0 \text{ t/m de geratriz}$$

Imposta:

$$M_{\pi/2} = -6.9 \times 0.6075 \ (0.500 - 0.318 = 0.182) = -0.76.$$

$$N_{\pi/2} = +\frac{6.9}{2} \times 1.0 = +3.45$$

Soleira:

$$M_\pi = -6.9 \times 0.6075 \ (0 - 0.318) = +1.33$$

$$N_\pi = 6.9/2 \times 0 = 0.$$

Resumo das Solicitações (cargas (1), (2) e (4)

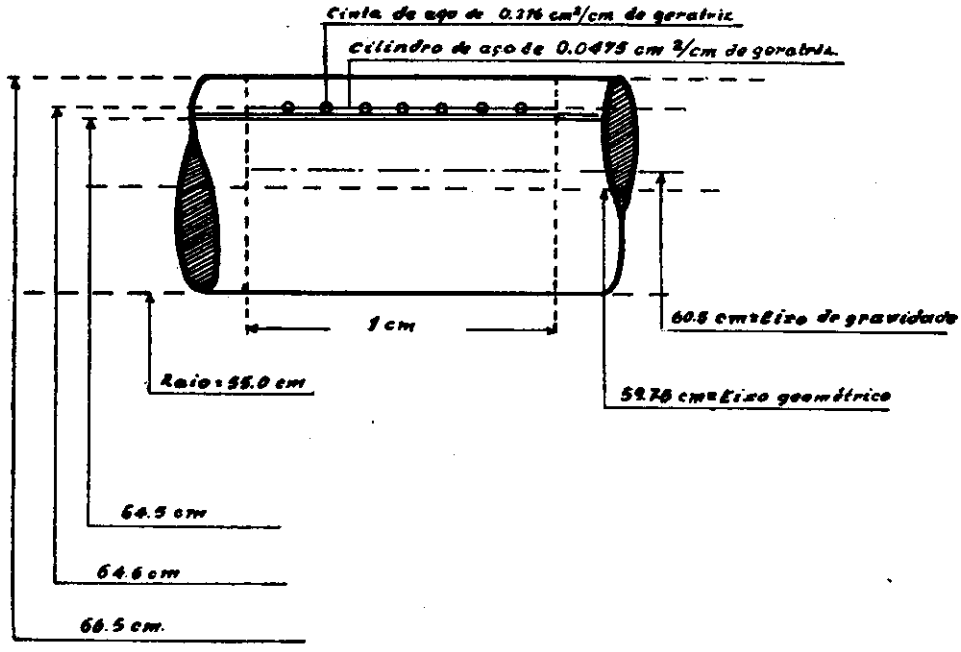
VÉRTICE	IMPOSTA	SOLEIRA
N = − 0.36 t/m	N = + 3.73	N = − 0.74
M = + 1.44 mt/m = 1	M = − 0.88	M = + 1.47

M é positivo quando o raio tende a aumentar.

N é positivo quando compressão.

CALCULO DAS TENSÕES

Secção A



a) — *Tôdas as cargas exceto pressão interna e da cinta,* aplicadas antes da deformação lenta e retração do concreto.

y = distância do c.g. da secção ao bordo inferior da mesma.

$F = F_b + n\ (Fe + F'e)$ = secção equivalente, onde F_b = área da secção de concreto da parede do tubo.

Fe e F'e as secções de aço da cinta e do cilindro.

Será ignorada a secção de aço do cilindro, porque sendo êste de aço doce soldável, seu limite de escoamento a compressão poderá ser excedido.

$$^{(*)}F = 9.5 + 0.216 \times 8 = 11.2\ cm^2.$$

Tomando momentos relativos ao bordo inferior,

$$y = \frac{9.5 \times 4.75 + (0.216 \times 8) \times 9.6 = 61.8}{11.2} = 5.5.cm$$

O momento de inércia relativo ao e_g. =

$$= \frac{1 \times (9.5)^3}{12} + 9.5 \times (0.75)^2 + (0.216 \times 8) \times (4.1)^2 =$$

$$= 71.2 + 5.3 + 29.0 = 105.5\ cm^4.$$

(*) = A capa foi excluída do cálculo porque a pressão interna ocasiona tensões maiores que o limite de resistência da capa. Vêr adiante. A cinta é considerada aderente ao cilindro quanto ao escorregamento.

Vértice:

A excentricidade é $= \frac{M = 1.44}{N = 0.36} = 4.00$ m, relativo ao eixo geométrico da secção.

$e_g = e + 0.0075 = 4.0075$ m = excentricidade relativa ao e_g. Notar que (*) 0.0075 m foi somado a "e" porque a fôrça N é de tração, agindo portanto em nível inferior ao eixo geométrico da secção.

$$\sigma_e = -\frac{3.6}{11.2} + \frac{3.6 \times 401 \times 4.0}{= 105.5} = 55 \text{ kg/cm}^2$$ de compressão na face externa do concreto. (1)

$$\sigma_i = -\frac{3.6}{11.2} - \frac{3.6 \times 401 \times 5.5}{105.5} = -76 \text{ kg/cm}^2$$ de tração na face interna.

Imposta:

$$e = \frac{M}{N} = \frac{0.88}{3.74} = 0.236 \text{ m.}$$

$e_g = e + 0.075 = 0.243$ m; onde 0.0075 foi somado porque N se acha do lado oposto ao e_g, em relação ao eixo geométrico.

$$\sigma_e = +\frac{373}{11.2} = \frac{37.3 \times 243 \times 4.0}{105.5} = -31 \text{ kg/cm}^2$$ de tração na face externa do tubo-núcleo.

$$\sigma_i = +3 + \frac{37.3 \times 243 \times 5.5}{105.5} = +50 \text{ kg/cm}^2$$ de compressão na face interna.

Soleira:

$$e = \frac{1.47}{0.74} = 1.97 \text{ m; e } g = e_g = e + 0.0075 = 1.98 \text{ m.}$$

$$\sigma_e = -\frac{7.4}{11.2} + \frac{7.4 \times 198 \times 4.0}{105.5} = +56 \text{ kg/cm}^2$$ de compressão na face externa do tubo-núcleo.

$$\sigma_i = -\frac{7.4}{11.2} - \frac{7.4 \times 198 \times 5.5}{105.5} = -77 \text{ kg/cm}^2$$ de tração na face interna.

Resumo — A tração máxima ocorre na face interna da soleira = − 78 kg/cm².

(*) = 0.0075 é a diferença entre a posição dos eixos de gravidade e geométrico.

(1) = Do concreto do tubo-núcleo e não da capa.

Tração na Cinta:

A região onde a cinta sofre um acréscimo de tração é na imposta. Esta tração será = N × (− 31) = − 250 kg/cm², onde 31 kg/cm² é a tração no concreto.

b) — *Cargas permanentes* (terra + pêso próprio + água contida e sobrecarga estática).

Solicitações — A carga equivalente no ensaio de 2 ou 3 cutelos: = 2.5 + 0.74 ~ *3.4 t/m* = carga da terra + calçamento.

Vértice:

$M_o = -3.4 \times 0.6075\ (-0.318) = +0.647$ mt/ de geratriz.
N_o = t/m de geratriz.

Imposta:

$M_{\pi/2} = -3.4 \times 0.6075\ (+0.182) = -0.37$

$N_{\pi/2} = +\dfrac{3.4}{2} = +1.7$

Soleira:

$M_\pi = -3.4 \times 0.6075\ (-0.318) = +0.65$
$N_\pi = 0.$

Resumo (terra, pêso próprio + água + calçamento)

VÉRTICE	IMPOSTA	SOLEIRA
M = + 0.75	M = − 0.50	M = + 0.79
N = − 0.36	N = + 1.98	N = − 0.74

1) — *As tensões antes da deformação lenta* — (com n = 8).

Vértice:

$e = \dfrac{0.75}{0.36} = 2.08$ m, relativa ao eixo geométrico.

$e_g = 2.08 + 0.0075 = 2.09$ m relativa ao eixo de gravidade.

$\sigma_e = -\dfrac{3.6}{11.2} + \dfrac{2.6 \times 209 \times 4.0}{105.5} = +28$ kg/cm² de compressão na face externa.

$\sigma_i = -28 \times \dfrac{5.5}{4} = -38$ kg/cm² de tração na face interna.

Imposta:

$$e = \frac{0.50}{1.98} = 0.252; \quad e_g = 0.26 \text{ m.}$$

$$\sigma_e = \frac{19.8}{11.2} - \frac{19.8 \times 26 \times 4.0}{105.5} = 2 - 20 = -18 \text{ kg/cm}^2 \text{ de}$$

tração.

$$\sigma_1 = \frac{19.8}{11.2} + \frac{5.5}{4} \times 20 = 2 + 27 = +29 \text{ kg/cm}^2 \text{ de com-}$$

pressão.

Soleira:

$$e = \frac{0.79}{0.74} = 1.07; \quad e_g = 1.06 \text{ m.}$$

$$\sigma_e = -\frac{7.4}{11.2} + \frac{7.4 \times 106 \times 4.0}{105.5} = -1 + 30 = +29 \text{ kg/cm}^2$$

de compressão.

$$\sigma_1 = -\frac{7.4}{11.2} - \frac{5.5}{4.0} \times 30 = -1 - 41 = -42 \text{ kg/cm}^2 \text{ de tração.}$$

2) — *As tensões depois da deformação lenta* (com n = 15).

Êste valor de "n" corresponde ao módulo verdadeiro do concreto quando a deformação se dá em ambiente unido (valor de $\delta t = \frac{10}{3} \times 10^{-6}$ cm²/kg — Ver T. v. Langendonck, v. I, pág. 197 e meu relatório anterior).

$F = 9.5 + 15 \times 0.216 = 12.74 \text{ cm}^2$.

Tomando momentos relativos ao bordo inferior da secção:

$$y = \frac{9.5 \times 4.75 + (0.216 \times 15) \times 9.6 = 763}{12.74} = 5.98 \text{ cm.}$$

Momento de inércia relativo ao eixo de gravidade:

$$J = \frac{(9.5)^3 \times 1}{12} + 9.5 \times (5.98 - 4.75 = 1.23)^2 +$$

$$+ 0.216 \times 15 \times (3.53)^2 = 71.2 + 14.4 + 40.4 = 126.0 \text{ cm}^4.$$

Vértice:

$$e_g = e + 1.23 \text{ cm} = 208 + 1 = 209 \text{ cm.}$$

$$\sigma_e = -\frac{3.6}{12.74} + \frac{3.6 \times 209 \times 3.5}{126.0} = -0 + 21 \text{ kg/cm}^2 \text{ de}$$

pressão.

$$\sigma_1 = -0 - 21 \times \frac{6.0}{3.5} = -36 \text{ kg/cm}^2 \text{ de tração.}$$

Imposta:

$$e_g = 0.252 + 0.01 = 25.3 \text{ cm.}$$

$$\sigma_e = 2 - \frac{19.8 \times 25 \times 3.5}{126.0} = 2 - 14 = -12 \text{ kg/cm}^2 \text{ de tração.}$$

$$\sigma_1 = 2 + \frac{6.0}{3.5} = +26 \text{ kg/cm}^2 \text{ de compressão.}$$

Soleira:

$$e_g = 107 + 1 = 108 \text{ cm.}$$

$$\sigma_e = -1 + \frac{7.4 \times 106 \times 3.5}{126.0} = +23 \text{ kg/cm}^2 \text{ de compressão.}$$

$$\sigma_1 = -1 - 22 \times \frac{6.0}{3.5} = -39 \text{ kg/cm}^2 \text{ de tração.}$$

3) — *As tensões depois da deformação lenta* (com n = 30)

O valor de n = 30 corresponde a $\delta_t = 10 \times 10^{-6} \frac{\text{cm}^2}{\text{kg}}$, isto é, deformação ao ar livre.

$$F = 9.5 + 30 \times 0.216 = 15.98 \sim 16.0 \text{ cm}^2.$$

$$y = \frac{9.5 \times 4.757 \ (0.216 \times 30) \times 9.6 = 107.3}{16.0} = 6.72 \text{ cm.}$$

$$J = \frac{(9.5)^3}{12} + 9.5 \ (6.72 - 4.75 = 1.97)^2 + 0.216 \times 30 \times$$
$$\times (2.80)^3 = 71.2 + 35.0 + 50.7 = \mathit{156.9\ cm^4}$$

Soleira:

$$e_g = 208 + 2 = 210 \text{ cm.}$$

$$\sigma_e = -0 + \frac{3.6 \times 210 \times 2.8}{156.9} = +13 \text{ kg/cm}^2 \text{ de compressão.}$$

$$\sigma_1 = -0 - 13 \times \frac{6.7}{2.8} = -32 \text{ kg/cm}^2 \text{ de tração.}$$

Imposta:

$$e_g = 25.2 + 2 = 27.2 \text{ cm.}$$

$$\sigma_e = +2 - \frac{19.8 \times 27.2 \times 2.8}{157} = +2 - 10 = -8 \text{ kg/cm}^2 \text{ de tração.}$$

$$\sigma_1 = +2 + 10 \times \frac{6.7}{2.8} = +26 \text{ kg/cm}^2 \text{ de compressão.}$$

Soleira:

$$e_e = 107 + 2 = 109 \text{ cm.}$$

$$\sigma_e = -1 + \frac{7.4 \times 109 \times 2.8}{157} = -1 + 14 = +13 \text{ kg/cm}^2 \text{ de compressão.}$$

$$\sigma_i = -1 - 14 \times \frac{6.7}{2.8} = -35 \text{ kg/cm}^2 \text{ de tração.}$$

c) — *Carga móvel:*

Solicitações:

$$M\phi = -\left(\frac{\text{sen}\,\phi}{2} - \frac{1}{\pi}\right).$$

$$N\phi = \frac{P}{2}\,\text{sen}\,\phi.$$

Vértice:

$$M_o = -3.6 \times 0.6075\ (-0.318) = +0.695 \text{ mt/m de geratriz.}$$

$$N_o = 0{,}00\text{t/m de geratriz.}$$

Imposta:

$$M_\pi = -3.6 \times 0.6075 \times 0.182 = -0.398$$

$$N_\pi = \frac{3.6}{2} \times 1 = 1.8$$

Soleira:

$$M_\pi = -3.6 \times 0.6075 \times (-0.318) = +0.695$$

$$N_\pi = 0.00.$$

Tensões:

$$1)\ n = 8^{(*)};\ m = 1 = \frac{\text{módulo de elasticidade na região comprimida}}{\text{idem, idem, na região tracionada.}}$$

Vértice:

$$\sigma_e = +\frac{695 \times 4.0}{105.5} = 26 \text{ kg/cm}^2 \text{ de compressão.}$$

$$\sigma_i = -\frac{695 \times 5.5}{105.5} = -36 \text{ kg/cm}^2 \text{ de tração.}$$

(*) n = 8 porque sendo móvel a carga, não há tempo para deformação lenta.

Imposta:

$$e_g = \frac{0.398}{1.8} + 0.0075 = 0.228 \text{ m.}$$

$$\sigma_e = \frac{18.0}{11.2} - \frac{18.0 \times 22.8 \times 4.0}{105.5} = + 1 - 16 = - 15 \text{ kg/cm}^2$$

de tração.

$$\sigma_i = 1 + 16 \times \frac{5.5}{4.0} = + 23 \text{ kg/cm}^2 \text{ de compressão.}$$

Soleira:

$\sigma_e = + 26 \text{ kg/cm}^2$ de compressão.

$\sigma_i = - 36 \text{ kg/cm}^2$ de tração.

(Tensões iguais às que ocorrem no vértice).

SECÇÃO B

I — *Tubo empregado pouco depois de colocada a cinta:*

Hipóteses:

A deformação lenta ocorre em ambiente úmido;

$$\text{a taxa} = \frac{1}{3} \times 10 \times 10^{-6} \text{ cm}^2/\text{kg.}$$

A pressão interna e a flexão transversal ocasionam na parede do tubo mais capa trações superiores ao limite de resistência da capa, tomado êste = 21 kg/cm² à tração simples (um mínimo).

A compressão originada no cilindro pela deformação lenta e retração da parede do tubo atinge o limite de escoamento do aço do cilindro, tomado êste limite = 2100 kg por cm².

A retração se dá em uma só etapa, depois de colocada a cinta, e ao ar livre, ficando reduzida a um quarto de seu valor inicial, depois de cheio o tubo, devido à reversão do processo.

a) ***Tensões causadas pela cinta*** e pela pressão interna, considerando a deformação lenta e a retração do concreto, e excluindo a capa e o cilindro de aço.

As equações a empregar:

$$\sigma_a = E_f \left(\frac{F}{E_f S_a} - K \varepsilon_a - \frac{\varepsilon_2}{1 + \mu'_t n} \right) + \Delta\sigma_a$$

$$\sigma_f = -E_f \left(\frac{\varepsilon_2}{1 + \mu'_t n} + \varepsilon_a + K \varepsilon_a \right) + \Delta\sigma_t$$

$$\sigma_t = -E_f \left(\frac{\varepsilon a}{n} - K \varepsilon'_a \mu'_t - \frac{\varepsilon_2 \times \mu' t}{1 + \mu'_t n} \right) + \Delta\sigma_t$$

Estas equações são dadas por T. v. Langendonck no volume I de Concreto Armado, pág. 323. Foram eliminados os têrmos contendo ε_1 porque a retração se dá, por hipótese em uma só etapa. As notações são as do autor citado. Foi introduzido o valor ε'_a para prever a aplicação da pressão interna pouco depois da cintagem.

σ'_a = tensão na cinta depois da deformação imediata = 5500 kg/cm².

$\mu'_t = 0.0227$ (foi excluído o cilindro de aço); $\mu' = 0$.

O valor de K:

$$K = \frac{a - e - 1^{-k\delta t}}{\mu'_t\, n}, \text{ onde } K = E_f \frac{\mu'_t}{1 + \mu'_t\, n},$$

vêr pág. 322, do citado autor.

$$k\delta_t = 2.1 \times 10^6 \times \frac{0.0227}{1 + 0.0227 \times 8 = 1.182} \times \frac{10 \times 10^{-6}}{3} = 0.134$$

$$K = \frac{1 - \dfrac{1}{e^{0.134}} = 1 - 0.874 = 0.126}{0.0227 \times 8 = 0.182} = 0.694.$$

O valor de ε'_a é ε_a reduzido porque a pressão interna é aplicada pouco depois de colocada a cinta.

$$\varepsilon'_a = \frac{F = \sigma'_a\, S_a}{S'_c(1 + \mu' n)\, Ec} - \frac{N = \rho \times r}{S'_c(1 + \mu'_t n)\, Ec} =$$

$$= \frac{5500 \times 0.216}{9.5(1 + 0.000 \times 8)\, Ec = 950\, Ec} -$$

$$- \frac{6.5 \times 55}{9.5(1 + 0.0227 \times 8)\, Ec = 11.2\, Ec} =$$

$$= \frac{125 - 32 = 93}{262.5 \times 103} = 354 \times 10^{-6}.$$

$$\sigma_t = -125 + \frac{2.1 \times 10^6 \; \begin{matrix}(400 \times 10^{-6})\\(100 \times 10^{-6})\end{matrix}}{1 + 0.0227 \times 8 = 1.18} \times 0.0227 +$$

$$+ 0.694 \times 354 \times 10^{-6} \times 0.0227 \times 2.1 \times 10^6 + 32 +$$

$$+ (\Delta\sigma_t = 32) = -125 + \begin{matrix}(16)\\(4)\end{matrix} + 12 + \begin{matrix}(32)\\(0)\end{matrix} =$$

= (− 77 kg/cm² de pois da reversão da retração (tubo cheio).
(− 65 kg/cm² antes da reversão (tubo cheio).

$$\sigma_a = 5500 - \frac{4}{0.0227} - \frac{12}{0.0227} + 32 \times 8 = 5500 - 180 - 530 +$$

+ 250 = 5000 kg/cm² com o tubo cheio sob pressão de serviço, depois da reversão da retração.

$$^{(*)}\ \sigma'_f = -\frac{19}{0.0227} - 125 \times 8 - \frac{12}{0.0227} + 0{,}0 = -690 -$$

$$-1000 - 430 = 2.120 \text{ kg/cm}^2 \text{ para tubo vazio.}$$

NOTA: — 1) Se fôr calculada a tensão final na cinta, considerando a capa, e reduzindo esta a uma secção equivalente de aço com $n_v = 15 = (n = 8) + 8\ (10/3 \times 10^{-6} \times 262.5 \times 10^3)$, para avaliar o efeito da deformação lenta e retração, o resultado será pràticamente o mesmo.

2) A perda máxima de tensão na cinta, com o tubo vazio: $\frac{16 + 12}{0.0227} = 1200$ kg/cm².

3) A capa não foi considerada ao calcular o efeito da retração: Qualquer tensão que ela possa receber será anulada quando a pressão interna e a flexão transversal elevarem a tração acima do seu limite de resistência.

b) *As tensões nas hipóteses mais desfavoráveis:*

1) Compressão no concreto:

A hipótese mais desfavorável ocorre na soleira, quando tôdas as cargas são aplicadas antes da deformação lenta e depois da reversão da retração, estando vazio o tubo.

Compressão inicial depois da reversão da retração: vêr Secção B letra (a) = − 125 + 4 = ...	— 121 kg/cm²
Compressão originada por tôdas as cargas exceto pela pressão interna e pela cinta, vêr Secção A, letra (a) = ...	— 57 " (*)
Total	— 178 kg/cm²

Ao mesmo tempo a compressão na face interna = − 121 + 78 = = − 43 kg/cm².

Dos 57 kg/cm², 26 kg/cm² são originados pela carga móvel. A primeira contém um fator de segurança de 1.75 e as restantes de 1.5.

Descontados os efeitos dêsses fatores, a compressão total = = *154 kg/cm² ~ (060 × 250 kg/cm² = 150 kg/cm²)*, onde 250 kg/cm² é o limite de resistência do concreto. Êste último valor (154) ainda poderá ser reduzido, se a compressão originada pelas cargas que pro-

(**) = O valor σ'_f foi calculado admitindo o cilindro de aço, notando-se que a hipótese de ser atingido o limite de escoamento do aço do cilindro é confirmada.

(*) O sinal foi invertido para se conformar com a nova convenção.

duzem flexão transversal fôr calculada levando em conta a variação do módulo de elasticidade devida a menor compressão na face interna da secção da soleira; (com um valor de relação entre os módulos da face interna para o da face externa de 1.5 para êste caso).

Assim, a tensão provisória é aceitável.

c) *Tensão na cinta:*

A hipótese mais desfavorável ocorre ao ser colocada a cinta. É a tensão précia nesta, antes da deformação imediata do concreto.

$$= \sigma'_a + \varepsilon_a \times E_f = (\frac{125}{E_c} \times E_f = 125 \times n = 125 \times 8 =$$

$$= - 1000 \frac{kg}{cm^2}) + (\sigma'_a = 5500\,kg/cm^2) = 6500\,kg/cm^2.$$

O limite de proporcionalidade do aço deverá ser superior a 6500 kg/cm².

Tensão permanente:

A hipótese mais desfavorável ocorre na imposta, depois da reversão da retração e depois da deformação lenta, com o tubo cheio sob pressão de serviço.

Tensão restante (vêr Secção B, I, (a)	= 5000 kg/cm²
Efeito das cargas permanentes Secção A (b), (2) = 12 × (n = 8)	100 kg/cm²
Total	5100 kg/cm²

O limite de resistência do aço deverá ser superior a 12700 kg/cm² = = (5100 × 2,5), onde 2 ½ é o fator de segurança.

c) *Tração no concreto* e compressão no cilindro de aço.

Serão consideradas adeante pois as hipóteses mais desfavoráveis ocorrem quando o tubo é empregado depois das deformações no concreto ao ar livre.

II — *Tubo empregado depois da deformação lenta e retração do concreto ao ar livre:*

a) Tensões originadas pela cinta e pela pressão interna, considerando a deformação lenta e a retração do concreto.

Hipóteses:

A deformação lenta ocorre ao ar livre, a taxa $\delta_t = 10 \times 10^{-6} \frac{cm^2}{kg}$.

As outras hipóteses são as mesmas do n.º I desta Secção B.

O valor de K:

$$K = \frac{1 - e^{-k\delta t}}{\mu'_t n}; \quad k = E_f \frac{\mu' t}{1 + \mu'_t n};$$

$$\mu'_t = 0.0227; \quad n = 8 \quad k\delta_t = 0.134 \times 3 = 0.402;$$

onde 0.134 é o valor anterior dado na letra (a) de I, desta Secção B.

$$K = \frac{1 - \frac{1}{e^{0.420}} = 1 - 0.670 = 0.330}{0.182} = 1.81.$$

O valor ε_a:

Não é reduzido porque a pressão interna é aplicada depois da deformação lenta.

$$\varepsilon_a = \frac{125}{262.5 \times 10^3} = 476 \times 10^{-6}$$

$$\sigma_t = -125 + \underset{(4)}{(16)} + 1.81 \times 476 \times 10^{-6} \times 2.1 \times 10^6 \times 0.0227 + \underset{(0)}{(32)} =$$

$$= 125 + \underset{(4)}{(16)} + 41 + \underset{(0)}{(32)} = \begin{cases} -36\,\text{kg/cm}^2 \text{ antes da reversão (com tubo cheio).} \\ -48\,\text{kg/cm}^2 \text{ depois da reversão (com tubo cheio).} \end{cases} \quad (1)$$

$$\sigma_a = 5500 - \underset{(180)}{(700)} = 1800 \underset{(0)}{(250)} =$$

$= 5500 - 180 - 1800 + 250 = 3800\,\text{kg/cm}^2$ com o tubo cheio sob pressão de serviço. (2)

b) As tensões nas hipóteses mais desfavoráveis:

1) *Tração no concreto:*

A hipótese mais desfavorável ocorre depois da deformação lenta, devido a carga (3), antes da reversão da retração e antes da deformação lenta devido a cargas (1) + (2) + (4), na face interna da soleira quando tôdas as cargas são aplicadas, estando o tubo cheio sob pressão de serviço.

---

(1) Se fôsse considerada a capa, a compressão restante no concreto seria ainda menor, devido à oposição dela à deformação lenta do núcleo.

(2) A perda máxima de tensão na cinta, com o tubo vazio $= \frac{16 + 41 = 57}{0.0227} =$ $= 2500\,\text{kg/cm}^2$; ocorre antes da reversão da retração. É oportuno observar que a elevada perda de tensão é superior ao mínimo acusado por Freyssinet ($1500\,\text{kg/cm}^2$) mas não atinge o máximo ($3000\,\text{kg/cm}^2$) que registra sòmente para pressões de 200 a 300 At.

1.º)	— Compressão simples restante depois da deformação lenta, antes da reversão da retração, estando o tubo cheio sob pressão de serviço (vêr B II (a))	+ 36 kg/cm²
2.º)	— Tração à flexão causada pelo pêso próprio do tubo, água contida, sobrecarga estática (vêr A (b), (1))	− 42 kg/cm²
3.º)	— Tração à flexão simples devida à sobrecarga móvel (vêr A, (c))	− 36 kg/cm²
	Tração total à flexão composta na face interna	− 42 kg/cm²

Ao mesmo tempo, a compressão na face externa será:

(vêr B, II, (a))	+ 36 kg/cm²
(vêr A, (b), (1))	+ 29 kg/cm²
(vêr A, (c))	+ 26 kg/cm²
Compressão total	+ 91 kg/cm²

Admitindo igual valor para as tensões à compressão simples e à tração à flexão simples enquanto o concreto se acha em compressão em tôda a secção, sobrará afinal uma tração equivalente à de flexão simples oriunda da carga móvel e do que resta do item 2.º. Digo equivalente à flexão simples porque não há solicitação normal na soleira (vêr A, (c)), ou é ela muito pequena (vêr A, B, (1)) e estando as deformações do concreto ainda na fase I depois de somado o item 2.º e longe da tensão da ruptura.

A tração final à flexão simples causada no concreto, na soleira = = *42 kg/cm²*. Esta tensão atinge o limite mínimo de resistência do concreto dos tubos de Ribeirão das Lages (vêr Tese do Eng. W. Grundig, tabela XIII, pág. 73), que foi de 43 kg/cm².

Outra forma de encarar o mesmo caso:

Admitindo que a compressão originada pela carga (3) é uniforme, portanto a solicitação é uma fôrça aplicada no centro de gravidade da secção equivalente, esta fôrça = 36 × 11.2 = + 403 kg/cm de geratriz = N'.

Ao mesmo tempo as cargas (1) + (2) + (4) ocasionam uma solicitação normal N = − 0.74 t/m de geratriz e um momento fletor M = + 1.47 mt/m de geratriz, relativo ao eixo geométrico da secção. Êste momento fletor (= M') relativo ao eixo de gravidade da secção =

---

(3) $\sigma'_f = \frac{19 - 41}{0.0227} - 125 \times 8 = -2100 - 1000 = 3100$ kg por cm², com o tubo vazio.

(4) A pressão interna para reduzir a zero a tensão no concreto (aplicada aquela logo após a cintagem) será 124/32 = 3.9 × a pressão de serviço.

$= (\frac{1.47}{0.74} + 0.0075) \times 0.74 = \sim + 1.47$ m t, onde 0.0075 é a diferença de posição entre os eixos geométricos e de gravidade.

Conjugando as solicitações:

$$N' = + \ 403 \text{ kg/cm de geratriz}$$
$$N = - \ 7 \text{ kg/cm de geratriz}$$
$$N' + N = + \ 396 \text{ kg/cm de geratriz}$$
$$M' = + \ 1470 \text{ cm kg/cm de geratriz}$$

$$\sigma_1 = + \frac{396}{11.2} - \frac{1470}{105.5} \times 5.5 = + 35 - 77$$

Aplicando o critério aproximado, indicado por T. van Langendonck (pág. 158, v. I de "Concreto Armado"):

$$\sigma_t = \frac{\sigma_{ts} \left(\frac{N}{S} + \alpha \frac{M}{W}\right)}{\frac{N}{S} + \frac{M}{W}},$$

onde "a" tem o valor = 2 e σ_t = tensão a flexão composta e σ_{ts} = tensão à tração simples.

$$\sigma_t = \frac{+ 35 - 154 = 119}{+ 35 - 77 = 42} \sigma_{ts} = 42 = 2.8 \ \sigma_{ts}$$

$$\sigma_{ts} = \frac{42}{2.8} = 15 \text{ kg/cm2 à tração simples}$$

Observação:

Pelo critério anterior, a tração à "flexão simples" foi tomada = = 42 kg/cm², que fica reduzida a *21 kg/cm² à tração simples* (empregando o fator "2"), portanto do lado da segurança.

A tensão permanente:

Não há redução a fazer, porque tôda a secção se acha em compressão (vêr B II (a)) para σ_t = 48kg/cm².

É oportuno notar que o item 2.º contém um fator de segurança de 1.5 e no item 3.º o fator é de 1.75.

É também de notar que a perda de tensão na cinta atinge 2500kg/cm² (vêr nota (1) de B, II (a)). Esta perda se aproxima do limite mais elevado de 3000 kg/cm² dado por Freyssinet sòmente para compressões da ordem de 200 a 300 At.; o limite mínimo de Freyssinet é de 1500 kg/cm². A conclusão é que as taxas de 10×10^{-6} cm²/kg e $400 \times 10^{-6} \frac{\text{cm}}{\text{cm}}$ em conjunto dão resultados bem a favor da segu-

rança quando comparados com os dados de Freyssinet. Um fabricante americano prevê apenas 20 % da tensão inicial para essa perda; neste caso não passaria ela de 0.20 × 5500 = 1100 kg/cm² perda essa quase igual a que encontrei para o caso da deformação lenta em ambiente únido (1200 kg/cm², vêr B, I, (a), nota 2).

Não dispondo de outros dados, prefiro conservar as taxas empregadas. Será de grande utilidade aproveitar a oportunidade para de acôrdo com o I.P.T. realizar ensaios que esclareçam êste ponto para futura economia de material, caso possam ser reduzidas as taxas empregadas.

2) Compressão na armadura interna: é desnecessário calcular, pois com a taxa mais baixa de deformação lenta, o limite de escoamento do aço do cilindro já foi atingido (vêr A, I, (a), nota (*).

RESUMO DAS TENSÕES CALCULADAS

Máximas tensões provisórias:

No concreto (− 42 kg/cm² à flexão composta (vêr B, II, (b), (1)).
(+ 178 kg/cm² (vêr B, I, (b), (1)).

Na cinta (− 5800 kg/cm² (vêr B, I, (b), (2)).

No cilindro (excede o limite de escoamento do aço (vêr B, II, (a),
((nota (3)).

TENSÕES FINAIS MAIS DESFAVORAVEIS (PERMANENTE MAIS PROVISÓRIA DA CARGA MÓVEL)

(1) No concreto (− 30 kg/cm² à flexão simples.

(2) Na cinta (− 5200 kg/cm².

No cilindro (atinge o limite de escoamento do aço.

TENSÕES FINAIS MAIS DESFAVORAVEIS (SÒMENTE AS PERMANENTES)

(3) No concreto (+ 6 kg/cm² de compressão simples.

Na cinta (− 5100 kg/cm² (vêr B, II (b), (2)).

No cilindro (excede o limite de escoamento do aço.

---

(1) = — 42 + 12 = — 30 kg/cm² à flexão (vêr B, II, (a) para 12).

(2) = — 5100 (vêr B, II, (b), (2)) — (15 (vêr A, (c) × 8 ≅ 100) = — 5200 kg/cm² na imposta).

(3) = — 30 (da nota (1)) — (— 36 de A, (c) = + 6 kg/cm².

Observação — Lembrar que as tensões à flexão simples contêm um fator de segurança de 1.5 e 1.75.

Observações:

Não foi considerada no cálculo qualquer variação de tensão na cinta originada pelo processo de protensão, pela variação do módulo de elasticidade e da espessura do concreto. Uma redução de tensão até 1000 kg/cm² poderá ser compensada por um acréscimo de 20 % na secção da cinta, e admitindo que o concreto tenha uma resistência de 250 kg/cm² no momento da aplicação da protensão; empregando compressão de 150 kg/cm² (0.6 × 250 = 150) em B, I, (a), com a mesma tensão na cinta (5500 kg/cm²).(*)

No caso B, II, (a), a protensão na cinta seria 4500 kg/cm² e a compressão no concreto 123 kg/cm².

O resultado final depois conjugadas as solicitações não seria alterado devido ao acréscimo no momento de inércia da secção, que iria reduzir a tração na soleira de quantidade aproximadamente equivalente à redução de compressão restante ocasionada pela tensão menor na cinta em B, II, (a) e maior perda de tensão originada pela deformação lenta.

Tensões para $\delta_t/3$ (σ'_t = 150 kg/cm² (= 125 + 20 %).
(σ'_a = 5500 kg/cm².

Aumentando S_a de 20 % teremos $S_a = 0.216 + 0.0432 = 0.0259.$

$$\mu'_t = 0.0262;\ k\delta_t = 2.1 \times 10^6 \times \frac{0.0259}{1 + 8 \times 0.0259 = 1.21} \times$$

$$\times \frac{10 \times 10^{-6}}{3} = 0.150$$

$$K = \frac{1 - \dfrac{1}{e^{0.150}} = 1 - 0.862 = 0.138}{0.0259 \times 8 = 0.21} = 0.658$$

$$\tau_a = \frac{5500 \times 0.259}{9.5\ E_c} - \frac{6.5 \times 55}{9.5 \times 1.21 = 11.5} =$$

$$= \frac{150 - 31 = 119}{E_c} = 453 \times 10^{-6}$$

$$\sigma_t = -150 \frac{\begin{matrix}(400 \times 10^{-6})\\(100 \times 10^{-6})\end{matrix}}{1.21} \times 0.0259 + 0.658 \times 453 \times$$

$$\times 10^{-6} \times 2{,}1 \times 10^6 \times 0.259 + 37 =$$

$$= -150 + \begin{matrix}(4)\\(17)\end{matrix} + 15 + \begin{matrix}(0)\\(31)\end{matrix} = \begin{matrix}(-100 \text{ tubo cheio})\\(-87 \text{ tubo cheio})\end{matrix}$$

(*) = Exigirá provàvelmente concreto de 300 kg/cm² aos 28 dias para satisfazer a letra (b) Secção B-I.

$$\sigma_a = 5500 - \frac{4 + 15}{0.0259} + 31 \times 8 = 5500 - 730 + 250 = 5000 \text{ kg/cm}^2$$

tubo cheio, depois da reversão da retração.

∴ *Mesmo resultado que foi obtido com $S_a = 0.216$*

Tensões para δ_t total
$$\begin{cases} \sigma'_t = 123 \\ \sigma'_a = 5500 - 100 = 4500 \\ \delta_a = 0.0259 \\ \mu'_t = 0.0262 \end{cases}$$

$$k\delta_t = 3 \times 0{,}150 = 0{,}450$$

$$K = \frac{1 - \dfrac{1}{e^{0.450}} = 1 - 0.639 - 0.361}{0.21} = 1.72$$

$$E_a = 123/E_c = 483 \times 10^{-6}$$

$$\sigma_t = -123 + \begin{matrix}(17)\\(4)\end{matrix} + 1.72 \times 483 \times 2.1 \times 0.0259 + \begin{matrix}(31)\\(0)\end{matrix} =$$

$$= -123 + \begin{matrix}(17)\\(4)\end{matrix} + 45 + \begin{matrix}(31)\\(0)\end{matrix} = \begin{cases} (-30 \text{ antes da reversão, tubo cheio.} \\ (-43 \text{ depois da reversão, tubo cheio.} \end{cases}$$

O acréscimo de aço aumenta o momento de inércia para 111 cm⁴, permanecendo pràticamente o mesmo valor da diferença entre e_g e o eixo geométrico, resultando uma redução de tração na soleira, equivalente à perda verificada na compressão restante (que passou de 36 kg/cm² a 30 kg/cm²).

PRESSÃO NECESSARIA PARA TENSÃO ZERO NO CONCRETO (= p^1)

$$\left.\begin{aligned} \tau_c &= \frac{pa - e\lambda E_f}{d + n\,e} \\ \tau_f &= \frac{n\,pa + d\lambda E_f}{d + n\,e} \end{aligned}\right\} \text{ vêr Toledo Malta, no I da Revista da R.A.E.}$$

$$5500 = \frac{9.5\ \lambda E_f}{9.5 + 8 \times 0.216 = 9.5 + 1.728 = 11.2}\ ;\ \lambda E_f = 6490$$

$$\text{para } \sigma_c = o;\ p = \frac{0.216 \times 6490}{55} = 25.5 \text{ kg/cm}^2$$

$$= (25.5/6.5 = 3.9) \times \textit{pressão de serviço.}$$

FLEXÃO LONGITUDINAL

Armadura longitudinal:

área da secção = $0.004 \times (\pi \times 64{,}5^2 - \pi\, 55^2) = 13000 - 9450)\ 0.04$ $= 14.2\ cm^2$ distribuídos ao longo de circunferência de raio = 60.75 cm.

Momento de inércia da secção:

$$+ \text{ (raio ext.)}^4 = + 64.5^4 = + 268 \times 10^5$$
$$- \text{ (raio int.)}^4 = - (55)^4 = - 167 \times 10^5$$
$$\pi/4 \times \Sigma = 101 \times 10^5 \times \pi/4$$
$$= 79{,}4 \times 10^5 = 7940000\ cm^4$$

$$\frac{n\, F_e\, r^2_e}{2} = \frac{8 \times 14.2 \times 64{,}5^2}{2} = 236000\ cm^4$$

$$J = 8176000\ cm^4$$

$$W = \frac{J}{r_e} = \frac{8176000}{64.5} = 126500\ cm^3$$

Pêso do tubo:

Concreto, volume = $3550\ cm^2 \times 100\ cm = 355000\ cm^3/m$ de geratriz
Capa, volume = $2\pi \times 65.5 \times 2 \times 100 = 82500\ cm^3/m$

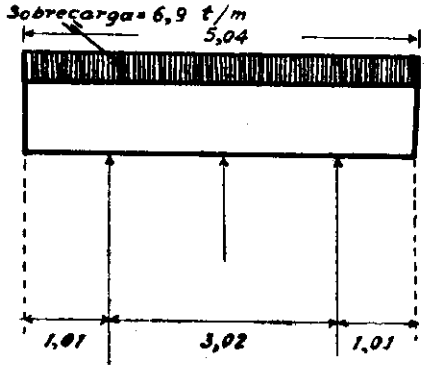
$437500\ cm^3/m$

Pêso, concreto mais capa = $437{,}5 \times 2{,}2 = 965$ kg/m de geratriz

$$\text{Pêso aço} = \frac{21.6 \times 2 \times 64.5 \times 7.8}{1000} = 68.500\ kg/m$$

$$\text{Pêso aço} = \frac{14.2 \times 100}{1000} \times 7{,}8 = 10.900\ kg/m$$

Sobrecarga = 6.9 t/m



Σ Pesos = 965 + 79 ..... = 1.044 t/m
Carga ..... = 6.900 t/m

Soma ..... 7.944 t/m

$$M_c = \frac{P \times 3.0^2}{8} = \frac{P \times (5.04 - 3.02)^2}{8} =$$

$$= 1.07 \times P - 0{,}5 \times P = 0.56\ Pmkg$$

$$\text{Tração na parede} = \sigma'_b = \frac{0.56P \times 100}{126500} = \frac{0.56 \times 7900 \times 100}{126500} = 3.5\ kg/cm^2.$$

NOTA:

Sobrecarga móvel — Ao calcular a sobrecarga móvel para o ensaio de 2 ou 3 cutelos foi admitido que 0.7 do pêso do compressor se acha sôbre o eixo trazeiro e foram empregados coeficientes de segurança e impacto 1.75 e 1.2 respectivamente. Uma revisão dos dados indica que a carga sôbre o eixo trazeiro é de 9 t, sendo de 7 t a parte que toca ao eixo dianteiro (vêr Löser, pág. 149 da edição alemã de 1938).

O espaço centro a centro das rodas é 1.6 m. O ensaio relatado na tabela 10, pág. 36 do livro de Marquardt acusa efeito muito pequeno da roda trazeira quando o seu afastamento horizontal da geratriz superior do tubo é de 1.79 m. Neste caso o afastamento seria apenas de 1.2 m (pois as rodas do compressor têm 0.40 de largura) desde que se considere o bordo interno da roda. Não há indicação de qual seja a proporção da carga, sôbre a roda afastada do tubo, que atingirá êste. Não será seguramente igual à carga relativa à roda que está sôbre o tubo. Admitindo que seja a metade, o total para as duas rodas seria

$$\frac{4.5 + \frac{4.5}{2}}{0.91} \times 0.21 = 1.5 \text{ t/m de tubo (vêr atrás para 0.91 e 0.21);}$$

êste valor é inferior ao efeito do cilindro dianteiro ($= \frac{7.0}{0.91} \times 0.21 =$ $= 1.6$ t/m), portanto deve ser considerado o cilindro dianteiro de preferência as rodas trazeiras.

O coeficiente mínimo de impacto aconselhado por Marquardt é 1.50, podendo atingir 2.0 (vêr pág. 38), ao passo que no cálculo empreguei 1.20.

Refazendo o cálculo com êstes dados, a carga para o ensaio de 2 ou 3 cutelos será $= \frac{1.6 \times 1.75 \times 1.50}{1.50} = 2.8$ t/metro em vez de 3.6 t/m calculada atrás, *ficando as tensões relativas a carga móvel reduzidas a 78 % do seu valor anterior.*

Esta vantagem poderá ser aproveitada para admitir uma maior variação de tensão ou para reduzir a secção inicial de aço para poder depois aumentar a compressão no concerto de mais 20 % por meio do aumento dessa secção, como foi feito nas "Observações".

(Correção análoga é aplicável ao cálculo referente ao tubo empregado em Chicago, passando a tensão resultante a 78 % do seu valor anterior).

O RESUMO DAS TENSÕES CALCULADAS (DEPOIS DA CORREÇÃO RELATIVA A CARGA MÓVEL)

no concreto (− 34 kg/cm² em flexão composta (tração)
(+ 172 kg/cm² em flexão composta

na cinta (− 5800 kg/cm²

no cilindro − excede o limite de escoamento do aço.

TENSÕES FINAIS MAIS DESFAVORAVEIS (PERMANENTE + + PROVISÓRIA DA CARGA MÓVEL)

no concreto (− 22 kg/cm² a flexão composta

na cinta (− 5200 kg/cm²

no cilindro − atinge o limite de escoamento do aço.

TENSÕES FINAIS MAIS DESFAVORAVEIS (SÒMENTE AS PERMANENTES)

no concreto (+ 6 kg/cm² de compressão

na cinta (− 5100 kg/cm²

no cilindro − excede o limite de escoamento do aço.

TUBO EMPREGADO EM CHICAGO

Diâmetro = 36″ = 91.5 cm; raio = 45.75 cm.
Espessura da parede = 3″ = 7.6 cm.
Aço da cinta = 14.4 cm²/metro.
Pressão de serviço = 37 lbs. poleg.² = 2.6 kg/cm.²
Tensão na cinta logo depois de colocada = 5600 kg/cm².

$$\mu' = 0; \quad \mu'_t = \frac{14.4}{7.6 \times 100} = 0.0189$$

Capa de 1″ de espessura = 2.5 cm.

Êstes dados foram extraídos de um artigo publicado em Waterworks & Sewerage, vol. 90, n.º 10 de Outubro de 1945 por engenheiros da Prefeitura de Chicago.

Sobrecarga de terra — admitindo = 1.5 m de terra argilosa molhada.

$$B = 91.5 + (7.6 + 2.5) = 91.5 + 20.2 = 111{,}7\,\text{cm}$$

$$H/B\ \frac{1.50}{1.12} = \mathit{1.34};\ C = 1.127;\ G_c = 1.127 \times 2 \times (1.12)^2 =$$

$$= 2.9\,\text{t/m}\ \textit{para a largura de vala} < \mathit{1.4\ B} > \mathit{1.55\ m.}$$

No ensaio de 2 ou 3 cutelos, a carga $= \dfrac{2.9}{\underset{\text{fator de correção}}{1.5}} = 1.9\,\text{t/m}$

Para largura de vala > 1.55.

$C_d = 1.6$ (fig. 11); $G = 1.6 \times 2 \times (1.12)^2 = 4.0\,\text{t/m}$

fator de redução = 1.9 (fig. 51); fator de correção = 1.5

No ensaio de 2 ou 3 cutelos, a carga $= \dfrac{4.0}{1.5 \times 1.9} \times \underset{\text{fator de segurança}}{1.5} =$

$= \mathit{2.1\ t/m}$

Sobrecarga estática — calçamento de paralelepípedes 0.5 m de cada lado do tubo.

$C_s = 0.75$ (tabela pág. 33); $G_g = 0.75 \times (1.12 + 1.0) \times \underset{\text{altura do paralepipedo}}{0.15} \times$

$\times\ 2.5 = \mathit{0.6\ t/m.}$
peso unitário da pedra

No ensaio de 2 ou 3 cutelos, $G_g = \dfrac{0.6}{\underset{\text{fator de correção}}{1.5}} \times \underset{\text{fator de segurança}}{1.5} = 0.6\,\text{t/m.}$

(*) *Sobrecarga móvel* — compressor de 16 t pêso total.

% da carga que atinge o tubo = 18 % (vêr fig. 26, pág. 39).

Atinge o tubo, a carga $= \dfrac{\overset{\%\ \text{no eixo trazeiro}}{16 \times 0.7}}{\underset{\text{vêr fig. 26, pag. 39}}{0.91}} \times 0.18 = 2.2\,\text{t/m}$

no ensaio, a carga $= \dfrac{\overset{\text{impacto}}{2.2} \times \overset{\text{segurança}}{1.2} \times 1.75}{\underset{\text{correção}}{1.5}} = \mathit{3.1\ t/m}$

Total da carga equivalente no ensaio:

$$2.1 + 0.6 + 3.1 = 5.8\,\text{t/m.}$$

Nota = 2.1 + 0.6 com fator de segurança = 1.5
3.1 com fator de segurança = 1.75

(*) = Vêr correção na última página.

Solicitações na parede do tubo:

Carga (1) = Pêso próprio:

$g = 0.101 \times 1.0 \times 2.4 = 0.24\,t/m^2$ de parede.

$$r = \frac{91.5}{2} + 5.05 = 45.75 + 5.05 = 50.8\,cm; \quad r^2 = 0.258\ m^2.$$

Soleira:

$$M = 0.4406 \times gr^2 = +\ 0.0273\,m\,t$$

$$N = 0.1666 \quad gr = +\ 0.0203\,t/m$$

Carga (2) — Água contida:

Soleira:

$$M = +\ 0.2203\ \gamma w r^3 = \quad 0.2203 \times 1.0 \times 0.133 = +\ 0.0293$$

$$N = -\ 1.4167\ \gamma w r^2 = -\ 1.4167 \times 1.0 \times 0.258 = -\ 0.364$$

Resumo de (1) e (2):

$$1.5 \times M = 1.5\ (+\ 0.0273 + 0.0293) = 0.0566\,t/m \times 1.5 = \\ = +\ 0.0850\,m\,t$$

$$1.5 \times N = 1.5\ (+\ 0.0203 - 0.364 = -\ 0.344\,t/m \times 1.5 = \\ = -\ 0.516\,t/m$$

Carga (4) — Terra + Carga estática + Carga móvel:

Soleira:

$$M_\pi = -\ 5.8 \times 0.508\ (-\ 0.318) = +\ 0.935\,m\,t$$

$$N_\pi = \quad 0.0$$

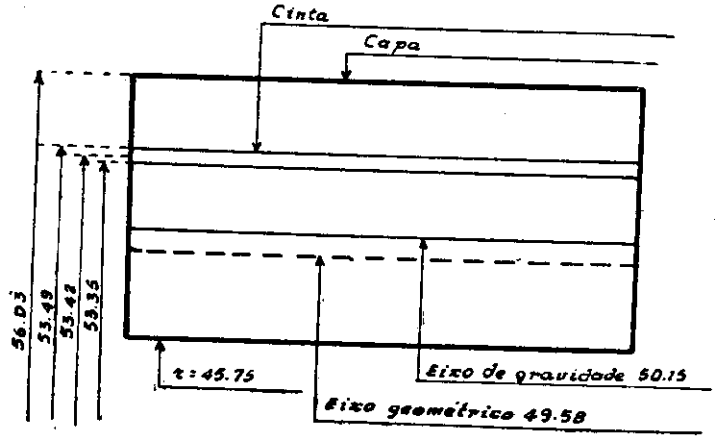
Resumo de (1), (2), (4):

Soleira:

$$M = +\ 0.085 + 0.935 = +\ 1.020\,m\,t$$

$$N = -\ 0.516\,t/m$$

Tensões na parede do tubo (excluindo a capa)



$$F = 7.6 + 0.144 \times 8 = 7.6 + 1.15 = 8.75\,\text{cm}^2$$

$$y = \frac{7.6 \times 3.8 + 1.5 \times 8.32 = 28.9 + 96 = 38.5}{8.75} = 4.40$$

$$J = \frac{7{,}63^3}{12} + 7.6 \times (0.6)^2 + 1.15 \times (3.3)^2 = 36.6 =$$

$$= 36{,}6 + 2{,}7 + 12{,}6 = 51.9\ \text{cm}^4$$

Soleira:

$$e = \frac{1.02}{0.516} = 197.5\,\text{cm}; \quad e_g = 197.5 - 0.6 = 196.9\,\text{cm}$$

$$\sigma_1 = -\frac{5.16}{8.75} - \frac{5.16 \times 196.9 \times 4.4}{51.9} = -0.6 = 86.2 = -87\,\text{kg/cm}^2$$

Tensões devidas à pressão interna e da cinta

$$\mu'_t = 0.0189; \quad n = 8; \quad \delta_t = 10 \times 10^{-6}\ \frac{\text{cm}^2}{\text{kg}}$$

$$K = \frac{1 - e^{-k\delta_t}}{{}_t n}; \quad k\delta_t = 2.1 \times 10^6 \times \frac{0.0189}{1 + 0.151} \times 10 \times 10^6 = 0.345$$

$$K = \frac{1 - \dfrac{1}{e^{0.345}} = 1 - 0.708 = 0{,}292}{0.151} = 1.93$$

$$\varepsilon_a = \frac{5600 \times 0.144}{7{,}6 \times 262{,}5 \times 10^3} = \frac{106}{262{,}5 \times 10^3} = 404 \times 10^{-6}$$

$$\sigma_t = -106 + \frac{2.1 \times 10^6 \begin{pmatrix} 400 \times 10^{-6} \\ 100 \times 10^{-6} \end{pmatrix}}{1 + 0.0189 \times 8 = 1.151} \times 0.0189 + 1.93 \times$$

$$\times 404 \times 2.1 \times 0.0189 + \frac{1.30 \times 2.6 \times 45.75}{7.6 + 8 \times 0.144} =$$

$$= -106 + \frac{(14)}{(4)} + 31 + \frac{119 \times 1.30}{7.6 + 1.1 = 8.7} = {}^{(*)}18$$

fator p/carga de enchimento

$$\sigma_t = \begin{cases} \text{antes da reversão da retração (tubo cheio)} = -43\ \text{kg/cm}^2. \\ \text{depois da reversão da retração (tubo cheio)} = -53\ \text{kg/cm}^2. \end{cases}$$

Perda máxima de tensão na cinta $= \dfrac{14 + 31 = 45}{0.0189} = 2400\ kg/cm^2.$

Tensões por tôdas as cargas:

TENSAO NO CONCRETO, NO CASO MAIS DESFAVORAVEL

Tensão provisória $= -43$ kg/cm² = compressão restante.

Tração na soleira $= \dfrac{+87\ \text{kg/cm}^2}{+44\ \text{kg/cm}^2}$ = tração na soleira à flexão composta.

ou seja + *22 kg/cm² à tração simples.*

Tensão final = (permanente + móvel):

$-53 + 87 = +34$ kg cm² em flexão simples.

Tensão Final (somente cargas permanentes)

$$M = \left(\frac{2.7}{5.8} \times 0.935 = 0.436\right) + 0.085 = 0.521\ \text{mt}$$

(*) = Sob a pressão de serviço a capa do tubo *não atinge* o limite de resistência da argamassa.

Para reduzir a zero a compressão é necessário que a pressão interna seja elevada a 5.9 vêzes a pressão de serviço. A capa oferece melhor proteção à cinta neste tubo que no de Santo Amaro, porque a pressão interna é insuficiente para nela ocasionar tração de ruptura. Apesar da maior relação neste tubo de Chicago entre a pressão para reduzir a zero a compressão no concreto logo após a colocação da cinta e a pressão de serviço (5.9 neste caso e 3.9 no de Santo Amaro), a tensão final provisória de tração é menor no caso de Santo Amaro, e a tensão final permanente é pràticamente a mesma nos dois casos. Êste fato ilustra a inconveniência de basear nessa relação o julgamento da segurança oferecida.

$$N = -0.516\,t$$

$$e = \frac{0.521}{0.516} = 1.01\,m = 100\,cm; \quad e_g = 100\,cm$$

$$\sigma_1 = + \frac{0.516}{8.75} + \frac{5.16 \times 100 \times 4.4}{51.9} = + 0.6 + 44 =$$

$$= + 45\,kg/cm^2 \text{ (tração)}$$

Tensão final = − 53 + 45 = − 8 kg/cm² de compressão.

Descontado o coeficiente de segurança de 1.5 para as sobrecargas e 1.30 para a pressão interna:

$$\sigma_t = -106 + \begin{matrix}(14)\\(4)\end{matrix} + 31 + 14 = \begin{matrix}(-47 \text{ (compressão)}\\(-57 \text{ (compressão)}\end{matrix}$$

Tensão máxima provisória na soleira:

$$87/1.5 - 47 = 58 - 47 = 11\,kg/cm^2 \text{ de tração}$$

Tensão final (permanente + móvel):

$$58 - 57 = 1\,kg/cm^2 \text{ de tração}$$

Tensão final permanente:

$$-57 + \frac{45}{1.5} = -27\,kg/cm^2 \text{ de compressão.}$$

(*) De página 47 — "Sobrecarga Móvel" — correção semelhante a que foi feita na última página dos cálculos de tubo para Santo Amaro cabe aqui.

As tensões relativas a carga móvel ficam reduzidas a 78 % de seu valor anterior.

O novo total da carga equivalente no ensaio = 2.1 + 0.6 + 2.4 = 5.1 t/m.

$$\sigma_1 \text{ na soleira } \frac{5.1}{5.8 = \text{valor anterior}} \times (-87) \text{ (= valor anterior)} =$$

$$= \sigma_1 = -76\,kg/cm^2 \text{ de tração.}$$

A tensão no concreto no caso mais desfavorável:

Provisória = − 43 + 76 = 36 kg/cm² de tração em flexão composta.

Final (permanente + móvel) = − 53 + 76 = + 23 kg/cm² em flexão composta.

Final (sòmente cargas permanentes) = − 53 + 45 = 8 kg/cm² de compressão.