Anais do Congresso Brasileiro de Patologia das Construções
CBPAT2016

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

MONITORAMENTO DE CORROSÃO EM CORTINAS ATIRANTADAS COM PROCESSO DE TÉCNICA DE MEDIÇÃO DE REFLECTOMETRIA POR IMPULSOS

MARCELO. CARRILHO
Engenheiro Civil
Reforço Engenharia e Recuperação
São Paulo-SP; Brasil
marcelo@reforcoengenharia.com.br

BÁRBARA. NAVA
Engenheira Eletrônico
Cordec do Brasil
São Paulo-SP; Brasil
barbara@cordecdobrasil.com.br

RESUMO

As estruturas de contensão no Brasil começaram a ser empregadas massivamente em torno de 35 a 40 anos atrás. A preocupação com a durabilidade contra corrosão dos elementos de tirante começaram a ocorrer de fato com a nova norma de execução de tirantes ancorados no terreno datada de 1996. Dessa forma, já foram registrados diversos acidentes de grandes proporções em cortinas atirantadas, sem aviso prévio, principalmente devido a corrosão. O "projeto tirante" desenvolvido em uma parceria entre engenheiros italianos e brasileiros, engloba desde o estudo padrão de tração dos tirantes, até o inédito ensaio de Corrosão por Reflectometria de Impulsos Elétricos, aliados ao moderno método de estudo de probabilidade de ruína em contenções, dando à obra um panorama geral de durabilidade e estabilidade da obra.

Palavras-chave: corrosão tirantes, reflectometria de impulsos elétricos, probabilidade de ruína, durabilidade de cortinas atirantadas, manutenção tirantes, monitoramento tirantes.

CORROSION TESTING OF GROUND ANCHORAGES WITH "REFLECTOMETRY IMPULSE MEASUREMENT TECHNOLOGY"

ABSTRACT

Anchored Structures in Brasil began to be used massively around 35 to 40 years ago. Durability concerning of metalic ground anchorages started after the year of 1996, with the revision of NBR-5629. Consequently, it´s been occuring colapse accidents mainly because of corrosion on the steel ground anchorages. The "Anchored Structures Project", developed between italian and brasilian engineers, putted together the standardized traccion survey with the corrosion study (using RIMT®) and the modern ruin analisys resulting on an excellent overview of durability and safety levels of the anchored structures.

Keywords: ground anchor corrosion, Reflectometry Impulse Measurement Testing, ruin probability, anchored retaining wall durability, ground anchor maintenance, ground anchor monitoring.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

1. INTRODUÇÃO

O "projeto tirante" tem-se desenvolvido em uma parceria Brasil-Itália entre empresas coligadas desde o ano de 2008, especificamente para cortinas atirantadas, com o objetivo de avaliar os níveis de conservação, segurança e durabilidade de tirantes ancorados no terreno ou rocha, e consequentemente de cortinas atirantadas como um todo, com aplicação massivamente no estado de São Paulo-SP.

O fato motivador deste desenvolvimento foi a dificuldade em se analisar e ensaiar este tipo de estrutura, na qual após a sua conclusão, não dá acesso visual aos elementos metálicos protendidos, que geralmente estão imersos em um solo quimicamente agressivo e nocivo aos tirantes que, por sua vez, servem como elemento principal de sustentação das cortinas atirantadas. Ou seja, uma possível falha ou colapso nestes tirantes devido a corrosão, que geralmente ocorrem de forma brusca e sem aviso, podem provocar danos imensuráveis a vida dos usuários diretos ou indiretos das contenções, assim como ao patrimônio.

Em um congresso da "ABEF- Associação Brasileira de Engenharia de Fundações" realizado no ano de 2002, discutiu-se exaustivamente qual seria a durabilidade efetiva de tirantes permanentes, já que não existe um programa de manutenção dos mesmos. Talvez 30 anos fosse um horizonte razoável na época da construção com as normas e padrões executivos então vigentes. Quanto tempo além desses 30 anos as cortinas suportariam? Os primeiros tirantes executados em solo no Brasil são de 1958 e diversas obras de grande porte de infraestrutura datam das décadas de 80 em diante, com pelo menos 30 anos de existência. Qual seria então o procedimento a ser tomado para avaliação e qualificação principalmente destas cortinas mais antigas?

Finalmente, os estudos aqui descritos, já aplicados no Brasil, vem de encontro a estes questionamentos e expectativas a fim de analisar mais profundamente qual o estado de conservação e níveis de segurança das cortinas atirantadas com tirantes permanentes.

2. PRINCÍPIOS BÁSICOS DOS ENSAIOS DE CORROSÃO

O método dos ensaios de reflectometria (RIMT®®) consiste essencialmente na emissão de um impulso de tensão sinusoidal de curtíssima duração (2μs a 2ηs) na extremidade de uma barra, fio ou cordoalha de aço, protendida. Tal sinal é captado por um fio de referência (também chamado de "antena") e a sua interpretação localiza, qualifica e gradua eventuais anomalias ou patologias presentes no aço (corrosão).

O aparelho RIMT®® é conectado ao elemento de aço a ser testado e o sinal é lançado (figura 1). Pela análise do caminhamento temporal do sinal refletido é possível traçar as características do tirante protendido e a relevância das eventuais anomalias encontradas.

De fato, o impulso que percorre o tirante protendido vem parcialmente refletido com modificações na sua frequência e sobrepondo-se ao sinal emitido. Isso ocorre por causa de variações localizadas de impedância devida basicamente às anomalias encontradas no decorrer do seu percurso.

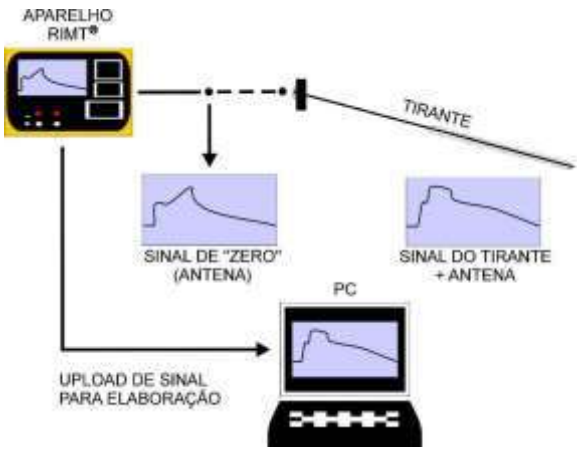


Figura 1 - Obtenção do sinal RIMT®®

Através de experimentações em laboratório, em barras de aço com defeitos propositadamente e previamente conhecidos e verificações diretas em canteiro, foram formuladas as correlações entre os diferentes tipos de anomalias e os três componentes da impedância **Z** (resistência ôhmica **R;** reatância indutiva $\mathbf{X_L} = \omega\mathbf{L}$ e reatância capacitiva $X_C = -1/\omega\mathbf{C}$).

Em ultima análise, há um estabelecimento entre a resistência ôhmica e a reatância indutiva que estão ligadas intimamente às características elétricas da barra de aço protendida. A reatância capacitiva depende essencialmente do meio físico envolvente e circunjacente.

Seguindo critérios paramétricos e variando um deles aleatoriamente, deixando os demais inalterados (com respeito a uma situação de integridade do conjunto barra de aço / meio envolvente - dielétrico , foram estabelecidas as seguintes relações:

- **Redução de secção do cabo** -> Aumento de **R** e **L**;
- **Oxidação do cabo** -> Aumento de **R**, forte aumento de **L** e leve incremento de **C**;
- **Imperfeição construtiva ou efeito deletério no envolvimento do tirante** -> Aumento de **C;**
- **Variação físico-mecânica do meio envolvente** -> Variação de **L**, de **C** e da velocidade de propagação do impulso **V**.

Analisando o sinal, para cada anomalia detectada, se identifica o **"tipo"** obtendo a variação da impedância e determinando os fatores resistividade, indutância e capacitância.

A **"característica"** vem pela medição do tamanho do sinal. Por fim, a **"distância L"** da cabeça de ancoragem, mediante a relação **L = V*t/2**, onde **t** é o intervalo de tempo de teste desde a partida do impulso até a chegada do eco refletido, **V** é a velocidade de propagação da onda elétrica no conjunto aço, igual a **1.432 -10^8 m/seg**.

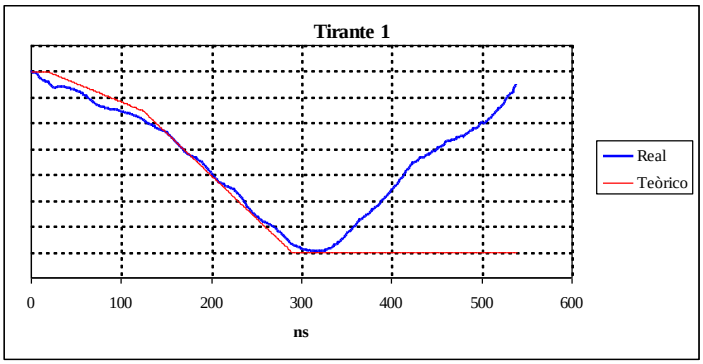


Figura 2 – Detalhe do sinal RIMT®® processado

A linha de cor vermelha significa a condição teórica "perfeita" e a azul, o comportamento do sinal no tirante testado.



Figura 3 - Correlação entre características do aço e parâmetros elétricos

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Na elaboração do sinal consideram-se o trecho livre e o ancorado com as suas características em relação ao dielétrico. A velocidade média do sinal em cada um é muito diferente. Na livre, cerca de 24-25 cm/seg e na injetada, 14-15 cm/seg.

A análise desse comportamento temporal indica o comprimento dos tirantes como se exemplifica na tabela 1. É importante considerar uma margem de erro em torno de 10% para cobrir com segurança interferências e influências no dielétrico analisado.

Tabela 1 - Exemplo de resultados de comprimentos RIMT®

Tirante	Cabo de conexão V = (0.2 m/s)		Comprimento trecho livre V = (0.25-0.26 m/s)			Comprimento trecho ancorado (bulbo) V = (0.14-0.15 m/s)			Comprimento total	
nº	ηs	m	ηs	Mín. (m)	Máx. (m)	ηs	Mín. (m)	Máx. (m)	Mín. (m)	Máx. (m)
T01	15	1,5	59	7,38	7,67	68	4,76	5,10	12,14	12,77

O tirante de exemplo T01 tem no mínimo 12,14 m e no máximo 12,77 m. O trecho livre parte do ponto 0 (cabeça de ancoragem) e mede no mínimo 7,38 m e no máximo 7,67 m. O trecho ancorado mede no mínimo 4,76 m e no máximo 5,10 m.

Com base nesses comprimentos são apresentadas as anomalias (corrosão) tanto do trecho livre quanto do trecho ancorado, graduando-as conforme tabela 2 apresentada a seguir.

A diferença entre comprimento teórico (fornecido pelo contratante) e comprimento medido (apresentado na tabela) se deve à influência do que chamamos “ecos de fundo”. Eco de fundo significa tudo com o que o sinal se depara (além das efetivas heterogeneidades) e que deve ser filtrado. Podem ser interferências da armadura frouxa, diferentes materiais em contato com o aço, umidade e etc. O comprimento medido é obtido a partir do programa de análise que processa e lê o tempo desses ecos de fundo do cabo. Assim se obtém um valor médio que multiplicado por cada tempo de eco de fundo, dá o valor do comprimento medido do cabo. Tal valor deve ser compatível - com um erro não superior a 10% - com o comprimento teórico. Por isso, a diferença entre ambos os comprimentos resulta no **erro médio** da localização da heterogeneidade, que vem posicionada sempre em relação ao comprimento medido e não ao teórico, assim como da injeção do trecho teórico do bulbo que, por muitas vezes, se prolonga ao longo do trecho livre do tirante, conforme o índice de fratura do solo de imersão.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

Após efetuados os ensaios de reflectometria, os sinais são processados em software e devolvidos em forma de tabelas com graduação das anomalias detectadas e localização destas que, muitas vezes, são contínuas ao longo de trechos e não pontuais. O sistema de graduação para interpretação dos resultados está descrito na tabela 2, a seguir:

Tabela 2 - Classificação de anomalias

CLASSIFICAÇÃO DE ANOMALIAS - RIMT®		
Atribuições ao tirante	**Graduação Qualitativa**	**Possíveis Intervenções**
Perda da superfície protetora com presença de oxidação muito superficial e difusa.	**Grau 1** Anomalia irrelevante, sem alguma redução de secção útil.	Nenhuma intervenção aplicável
Presença de leve oxidação localizada, com formação de pequenos pontos de corrosão em zonas esparsas.	**Grau 2** Anomalia leve, com formação de camada de óxido superficial.	Verificar evolução com intervalos de em média 1 a 2 anos
Presença de pontos de oxidação mais relevantes, seja em profundidade tanto quanto em extensão.	**Grau 3** Anomalia com redução de até 15% da secção do aço na região indicada, com possível comprometimento do sistema.	Verificar evolução dos problemas com medições periódicas a cada no máximo 12 meses.
Forte corrosão com presença de crosta de notável relevância.	**Grau 4** Redução da secção útil do tirante na região indicada acima de 15% com comprometimento do sistema.	Verificar a evolução através de medições mensais e a eventual necessidade de reforço.

É oportuno ressaltar que a definição dos defeitos está sujeita a determinadas condições, tais como:

- Anomalias contínuas são tratadas como uma única de grau semelhante ao máximo presente na zona considerada;
- Dependendo do nível de umidade no ambiente, quando da realização dos testes, uma tolerância de aproximadamente 10% em relação a posição apontada deve ser considerada para a localização das anomalias, conforme comentado anteriormente;
- A presença de fortes anomalias (graus 3, 4 ou 5) em tirantes próximos ao testado poderia, localizadamente, incrementar o sinal relativo à heterogeneidade detectada;
- A presença de anomalias próximas às cabeças de ancoragem nem sempre são atribuidas completamente a defeitos. Elas podem resultar de influências do acoplamento da instrumentação bem como da dispersão da energia emitida no cabo por causa da geometria da ancoragem. Para isso, são feitos os testes RIMT® HS, de modo a analisar especificamente os primeiros 80 cm iniciais para a detecção de descontinuidades ou de redução de seção do aço, fruto de corrosão ou estricção do mesmo.
- O simples fato do tirante possuir pits de corrosão (nível 2 acima), na presença de hidrogênio atômico, já pode ser o suficiente para a falência do mesmo devido ao fenômeno denominado como SCC (Stress Corrosion Cracking), sendo portanto imprevisível o comportamento do aço dos tirantes sujeitos a este fenômeno e consequentemente não sendo garantidos os níveis de segurança estrutural do tirante.
- É extremamente importante a análise dos ensaios de corrosão levando-se em conta o fenômeno da corrosão sob tensão, que torna o aço dos tirantes mais frágeis e susceptíveis a corrosão quanto maior for a sua tensão de protensão.

2.1 Exemplos Visuais Práticos – Graduação de Anomalias

A título de exemplificação e visualização dos resultados RIMT®, apresentamos abaixo exemplos com imagens de graus de corrosão (grau 2 a grau 5) em ensaios RIMT® teste realizados em barras de aço com posterior exumação da barra enterrada para verificação e aferição da graduação.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459


Grau 2 localizado (exumação em estrada)


Grau 3 generalizado (exumação em estrada)


Grau 4 tendendo ao Grau 5
(exumação estaios torres transmissão)


Grau 2 com rompimento por SCC
(exumação em estrada)

Figura 4 - Exemplos de graduação de anomalias em tirantes exumados para comprovação dos resultados RIMT®

3. DEMAIS ENSAIOS REALIZADOS

3.1 Ensaio de Tração

Para fins de comparação entre tirantes ensaiados anteriormente pelo processo RIMT®, são executados ensaios de tração do tipo recebimento, conforme NBR-5629, comparando os resultados com os níveis de corrosão, que devem corroborar os resultados.

A carga de trabalho de projeto (Ct) nos tirantes é determinada pelo projeto, caso exista registro do mesmo ou por avaliação de consultor geotécnico, conforme tipo de tirante e características da contensão. Seguem abaixo imagens ilustrativas da realização dos ensaios de tração.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459



Figura 5 - Preparo de tirante para realização de ensaios de tração do tipo recebimento



Figura 6 - Realização de ensaios de tração do tipo recebimento

3.2 Ensaios Complementares

Os ensaios complementares servem para análise tanto da cortina de paramento (parede diafragma) quanto do meio envolvente dos tirantes. Em casos mais complexos são analisados inclusive o aço metalograficamente e quimicamente para estudo de fraturas ocorridas quando das inspeções. Seguem abaixo de forma pormenorizada os ensaios complementares realizados.

3.2.1 Potencial de Corrosão

Os ensaios de potencial de corrosão são executados seguindo instruções e recomendações da norma americana ASTM C876-09 - "Standard Test Method for Corrosion Potentials of Uncoated Reinforcing Steel in Concrete" através da técnica de medição por meia célula com equipamento devidamente calibrado e específico para este fim.

De acordo com norma americana ASTM C876-09, os resultados dos ensaios são representados e analisados de acordo com a seguinte tabela:

Tabela 3 - Graduação dos Ensaios de Potencial de Corrosão

Ensaios de Potencial de Corrosão	
Norma: ASTM C876-09	
Leitura	**Interpretação**
mais positivo que -200 mV	90% de probabilidade de NÃO HAVER corrosão
entre -200 e -350 mV	Probabilidade de corrosão incerta
mais negativo que -350 mV	90% de probabilidade de HAVER corrosão

Sendo assim, em cada cortina a ser estudada, delimitam-se as áreas de diafragma a serem ensaiados e então é demarcada uma área com matriz de nxn pontos, espaçados a cada 1 pé (30,5 cm), conforme recomendações contidas na ASTM C876-09, devidamente conectadas por eletrodo a malha de aço interna da estrutura.



Figura 7 - Realização de ensaios de potencial de corrosão em cortina atirantada

3.2.2 Pacometria

Os ensaios de pacometria são feitos por meio de equipamentos portáteis e utilizam tecnologia de indução de pulso magnético para detectar as barras de reforço. As bobinas na sonda são periodicamente carregadas com pulsos de corrente e, assim, geram um campo magnético. Correntes parasitas são produzidas sobre a superfície de qualquer material eletricamente condutor que estiver no campo magnético. Elas induzem um campo magnético na direção oposta. A mudança resultante na tensão pode ser utilizada para a medição, coforme figura abaixo.

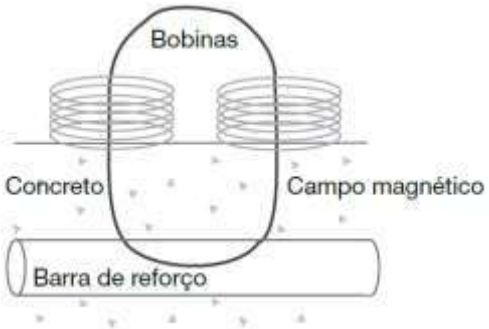


Figura 8 - Princípio indutivo gerado nos ensaios de pacometria para leitura das barras de aço internas.

Abril de 2016
ISSN 2448-1459



Figura 9 - Realização dos ensaios de pacometria com demarcação das armaduras para posterior ensaio de potencial de corrosão.

Os pacômetros modernos utilizam combinações diferentes de bobinas para gerar diversos campos magnéticos. O processamento avançado de sinais permite:

- Localização de uma armadura;
- Determinação da camada de concreto
- Estimativa do diâmetro da barra;
- Determinação da orientação de uma armadura.

De posse dos ensaios de pacometria, obtem-se a malha de armação padrão (malha externa) da parede diafragma para auxiliar em posterior verificação de empuxos portantes (caso seja necessária a verificação numérica). Estes ensaios permitem ainda a locação das barras para realização da extração dos corpos de prova sem atingir as armaduras, assim como a realização dos ensaios de potencial de corrosão de maneira mais efetiva.

3.2.3 Extração de Corpo de Prova e Ruptura a Compressão

Este ensaio é efetuado a fim de se verificar a espessura média da parede diafragma, assim como analisar a resistência a compressão do concreto, para fins de verificação de empuxos portantes (caso necessário), assim como a estimativa de parâmetros de durabilidade baseados nos cobrimentos e resistência do concreto empregado.



Figura 10 - Extração de corpo de prova em concreto da parede diafragma.

Alternativamente, são empregados ainda testes de esclerometria e ultrassom do concreto para se obter dados de homogeneidade e qualidade do concreto ao longo de toda a parede.

3.2.4 Resistividade Elétrica

Este ensaio tem como principal finalidade a determinação da capacidade do solo em transportar elétrons do meio, gerando corrente elétrica no caso da existência de diferença de potencial. Quanto maior a resistividade do solo, melhor a capacidade de "isolamento" dos elementos estruturais suscetíveis a condução de corrente, neste caso os tirantes metálicos inseridos no solo. A análise da resistividade do solo não é conclusiva sobre os tirantes especificamente, mas dá uma ideia de qual a zona com maior probabilidade de corrosão, em caso de surgimento de correntes elétricas.

A resistividade do solo não é mais do que a resistência medida entre duas faces opostas de um cubo, de composição teórica homogénea, com um metro de aresta. A sua unidade é o "ohm.metro". A resistividade do solo depende essencialmente da composição do terreno (solo arável, areia úmida, argila, etc) e também do comportamento sazonal. Um solo úmido apresenta uma resistividade inferior a um terreno seco.

3.2.5 Análises dos Elementos Solo e Água

Em estudos mais aprofundados, onde eventuais rupturas de tirantes ocorram aleatoriamente, sem fator causador claramente definido, podem ser efetuados estudos do solo a água (caso exista nível de lençol freático) por detrás da cortina de paramento, analisando-se principalmente pH, CO2 agressivo, teor de sulfatos, teor de cloretos, presença de hidrogênio atômico e teor de íons de outras substâncias dissolvidas no meio.

3.2.6 Análise do Aço

Em analogia a análise do solo e da água, no caso de presença de tirantes rompidos (ou parte deles), podem ser analisados suas composições químicas e metalográficas a fim de se diagnosticar se existe alguma substância prejudicial ao elemento aço na sua composição.

3.2.7 Exame Tactil Visual

Este exame é feito antes e depois da quebra das cabeças dos tirantes escolhidos para ensaio, com o objetivo de localizar indícios de patologias visualmente preexistentes nas cabeças de proteção dos tirantes e nas cortinas de paramento, servindo de parâmetro para escolha dos tirantes e locais a serem ensaiados. É importante a análise da adesão da cabeça de proteção de concreto à cortina, por onde possam ingressar agentes agressivos e vapor d´agua na região da cabeça de ancoragem.

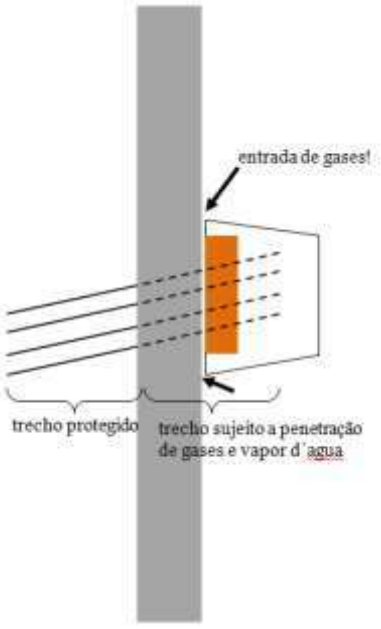


Figura 11 - Croqui genérico mostrando trecho do tirante mais susceptível e ação das intempéries

Abril de 2016
ISSN 2448-1459

3.3 Estudo de Probabilidade de Ruína

Este estudo é executado por consultor geotécnico que, de posse dos ensaios realizados, principalmente os de Reflectometria (RIMT®) e os de tração, estabelecem os níveis de fator de segurança de projeto e atuais das cortinas estudadas, assim como as probabilidades de ruína das obras, baseadas no fator "β" (índice de confiabilidade do fator de segurança) e em níveis de aceitação internacionalmente praticados.

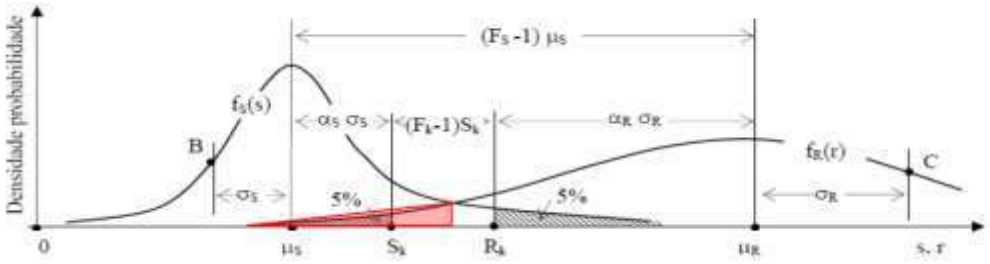


Figura 12 - Curvas de resistência e solicitação e fatortes de segurança médio e característico

Então, a probabilidade de ruína representa a quantidade de eventos, dentro de possíveis valores dispersos em duas distribuições normais, uma de resistência e outra de solicitação, na qual as solicitações são maiores que as resistências (figura 12).

4. CONCLUSÕES FINAIS

De posse dos resultados de integridade e testes de tração dos tirantes, aliados ao estudo da parede diafragma em concreto armado e dos agentes agressivos envolventes, concluem-se sobre os níveis de durabilidade dos elementos constituintes da contenção que, adicionalmente, são estudados numericamente os níveis de segurança das obras aliados ao moderno estudo de probabilidade de ruína em fundações.

Sendo assim, surge uma nova proposta e metodologia de estudos de durabilidade e avaliação de cortinas atirantadas pioneira no Brasil que vem dando bons resultados e podendo-se prever e remediar possíveis colapsos de cortinas que sempre geram extremos danos ao patrimônio e a natureza.

De acordo com a fonte "ground anchorages and anchored structures in service - G. S Littlejohn", de 35 casos de falhas por ruptura dos tirantes em cortinas atirantadas estudadas na Europa, pode-se concluir o seguinte do estudo por ele realizado (traduzido):

(...) "
A corrosão é localizada e aparece independentemente do tipo de tirante, nos quais 9 rupturas envolveram barras, 19 rupturas envolveram fios e 8 rupturas envolveram cordoalhas;
O período de serviço antes da ruptura variaram desde poucas semanas após a conclusão da obra, até muitos anos para cada tipo de tirante. As rupturas com poucas semanas de serviço ocorreram devido ao fenômeno do Stress Corrosion Cracking (SCC) ou perda de ductilidade devido ao hidrogênio;
Em relação a localização das rupturas, 19 incidentes ocorreram no primeiro metro de tirante, contados a partir do elemento de ancoragem, 21 incidentes ocorreram ao longo do trecho livre e 2 incidentes ocorreram no bulbo de ancoragem.
" (...)

Portanto, as rupturas de tirantes ancorados em solo podem ser nos locais mais variados possíveis, inclusive no bulbo de ancoragem, ocorrendo porém com maior frequência no primeiro metro a partir da cabeça de ancoragem.

Outra importante e mais preocupante conclusão é quanto ao desempenho de tirantes sujeitos a corrosão, mesmo em níveis baixos que diz:

(...) "É notável que não existe atualmente um método estabelecido na indústria de tirantes que possa prever o desempenho futuro de componentes de ancoragem com corrosão(...)"

Vale lembrar que, o fato de um tirante apresentar corrosão de grau menor que 3 nos ensaios RIMT® não garante que o elemento estrutural irá apresentar durabilidade compatível com os níveis de segurança exigidos, visto que o fenômeno da *SCC - Stress Corrosion Cracking* anteriormente comentado pode ocasionar uma ruptura frágil e imprevisível do mesmo.

5. REFERÊNCIAS

[1] Littlejohn, G.S. - *Ground Anchorages and Anchored Structures in Services*. ICE, 2007, 494 p.
[2] Congresso de Durabilidade de Tirantes Permanentes, Instituto de Engenharia de São Paulo, ABMS, 2012.
[3] Kapp H, Nava G, Seifert N., "Integritas und korrosionprufungen an vorspasnnkablen iun brukendabewerken". St. Gall, Dec 1990.
[4] Millman J., Taub H., "Pulse digital and switching waveform" – McGraw-Hill Book Company, New York 1965.
[5] Autostrade SpA, CND, Programma di Ricerca per lo Sviluppo del Metodo RIMT® - 1994.
[6] Donferri M., Gennari Santori A., Nava G., Tommasini M., "Prestressing Cables Inspection and Assemble by Means of The Reflectometric Method – Bridge Management 2 – Thomas Telford 1993.
[7] Camomilla G., Doferri M., Gennari Santori A, Materazzi L., Reflectometric and dynamic measurement of the stays of the Polcevera Viaduct in Genoa (Italy) – Bridge Management 3 – Thomas Telford 1994.
[8] RILEM 2012, Non Destructive Assessment of Concrete Structures: Reliability and Combined Techniques, Ed. Breysse, 2012, 374p.