

SISTEMA AUTOMÁTICO DE MEDIÇÃO PARA ENSAIOS DE ANCORAGENS

P. Gil Morais¹, C. Almeida Santos¹, Mariana R. de Carvalho²

¹ *Centro de Instrumentação Científica (CIC)*

² *Departamento de Geotecnia (DG)*

Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC),

Av. do Brasil 101, 1700-066 Lisboa, Portugal

RESUMO

Esta comunicação descreve o desenvolvimento de um sistema automático de medição utilizado na realização de ensaios de ancoragens. Apresenta-se uma breve descrição da metodologia e condições de realização dos ensaios, grandezas a observar, e outros aspectos que condicionaram o desenvolvimento do sistema. Descreve-se, em seguida, de forma detalhada o equipamento de medição, baseado em sensores inteligentes (“*Smart-Sensor*”) e respectivas interfaces mecânicas.

Por último, apresentam-se alguns resultados obtidos durante a realização de um ensaio de campo, realizado em paralelo com o sistema de medição que tem vindo a ser utilizado desde longa data pelo LNEC para a realização deste tipo de ensaios.

1. INTRODUÇÃO

O crescimento demográfico dos centros urbanos nas últimas décadas, associado à criação de novas infra-estruturas rodoviárias e ferroviárias, tem conduzido a um aumento notável da construção de obras ancoradas. As ancoragens constituem uma forma de conferir estabilidade às obras de suporte, quer durante a fase de construção (ancoragens do tipo provisório), quer durante o tempo de vida útil destas obras de engenharia (ancoragens do tipo definitivo) [1].

As ancoragens são tirantes pré-esforçados que introduzem uma força de compressão, coaxial com a direcção da armadura, mobilizando a resistência ao corte do maciço na zona selagem (fig. 1).

A integridade e o comportamento das ancoragens durante o seu tempo de utilização são factores determinantes na segurança das obras de engenharia onde são aplicadas, principalmente no caso de ancoragens com carácter definitivo; surge assim a necessidade de desenvolver e aperfeiçoar métodos que permitam caracterizar e antever eventuais comportamentos anómalos associados às ancoragens construídas, resultantes de métodos de construção inadequados e/ou mal executados ou ainda, de alterações verificadas ao nível dos solos (ex. variação do nível freático) [1].

Encontra-se actualmente em curso um trabalho de investigação [1] que, entre outros objectivos, pretende automatizar a recolha de dados dos ensaios de ancoragens, de forma a otimizar a sua medição e a análise dos resultados, definir metodologias de ensaio e minimizar a intervenção do pessoal operador durante as fases de preparação e realização dos ensaios. Este conjunto de acções irá ter repercussões directas, ao nível da fiabilidade dos resultados, nos custos operacionais e na segurança. Libertam o operador dos trabalhos penosos de medição e registo de dados, permitindo que este dedique o seu tempo à vigilância e interpretação do comportamento da ancoragem, face ao programa de ensaio imposto. Tendo por base a informação detalhada (dados processados), sob a forma numérica e/ou gráfica, o operador poderá tirar conclusões *in-situ* relativas a eventuais desvios do comportamento da ancoragem face ao previsto e, eventualmente, alterar o programa de ensaio.

Dos diversos tipos de ensaios realizados sobre ancoragens o mais abrangente em termos do número de grandezas medidas e da extensão do programa de ensaios é o designado por ensaio detalhado. Assim, foi este tipo de ensaio que condicionou o desenvolvimento do sistema e ao qual irá ser feita referência nesta comunicação.

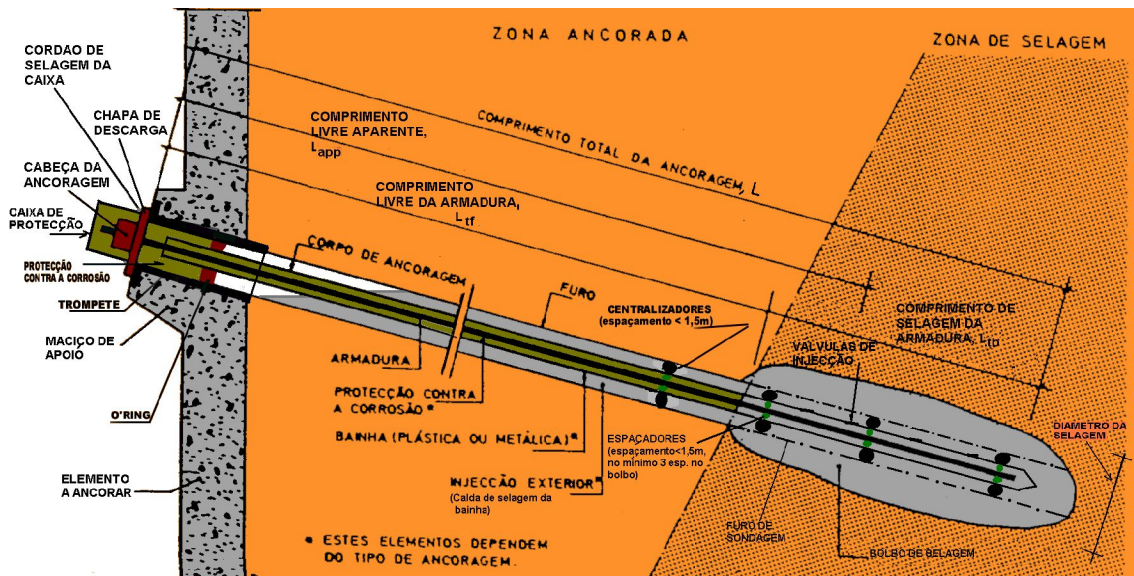


Fig. 1 – Desenho esquemático, em corte, de uma ancoragem [1].

2. METODOLOGIA DE ENSAIO

A caracterização do comportamento de uma ancoragem durante a realização dos ensaios detalhados requer a observação de um conjunto alargado de grandezas, nomeadamente: 1) a força axial aplicada na ancoragem; 2) a pressão do circuito hidráulico do sistema de aplicação de carga; 3) o deslocamento de diversos pontos de observação relativamente a um referencial fixo, nomeadamente a extremidade livre da armadura da ancoragem e o muro de suporte; 4) o movimento da haste do actuador relativamente ao corpo; e 5) a temperatura e a humidade ambiente (T/H). Este tipo de ensaio, normalmente realizado na fase inicial da obra, é apenas efectuado nas ancoragens seleccionadas para o efeito, pelo projecto da obra, e nas seleccionadas para observação durante a sua vida útil. No final do ensaio a ancoragem é, geralmente, pré-esforçada à força de tracção de blocagem, definida no projecto, e os sistemas de aplicação de carga e de medição são removidos, com excepção da célula de força nas ancoragens que se pretenda monitorizar.

Esta tarefa tem vindo a ser realizada pelo Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC) utilizando instrumentação com leitura e registo manual, de instalação difícil face às condições normalmente encontradas em obra. Tal facto está intimamente ligado à natureza dos locais onde são normalmente utilizadas ancoragens, como sejam obras de suporte de taludes e aterros, quase sempre com declives acentuados e acesso difícil. Para a realização dos ensaios é frequentemente requerida a construção de uma plataforma de trabalho, sobre a qual é necessário instalar, para além do sistema de medição, o sistema de aplicação de carga constituído por uma unidade energética óleo-hidráulica e um actuador hidráulico. O posicionamento deste último componente relativamente à ancoragem e à obra de suporte é imposto pela geometria da ancoragem, dificultando a montagem do sistema de medição e limitando a circulação do pessoal operador (cf. fig. 2).

No início do ensaio é aplicada uma carga residual à ancoragem, que geralmente corresponde a 10% da carga de tracção máxima do ensaio, designada por T_0 , e medição do conjunto das grandezas. Esta carga inicial destina-se a garantir que todos os elementos se encontram ajustados e foram absorvidas todas as folgas iniciais de montagem, e permite, também, verificar o posicionamento relativo e o estado de todos os componentes. A EN1537 [2] preconiza três métodos de ensaios para ancoragens. No nosso País o método 1 é o utilizado com maior frequência, o qual consiste na aplicação de ciclos incrementais de carga e descarga até à carga máxima do ensaio. À carga máxima de cada ciclo incremental, e durante um determinado intervalo de tempo, realizam-se medições dos deslocamentos da cabeça da ancoragem.

O ciclo de carga ($T_i, i > 0$) compreende a fase de carga crescente, desde o valor de patamar T_0 até se alcançar o valor pretendido, seguido de um intervalo de tempo com carga constante – patamar de fluência; decorrido o intervalo de tempo estipulado realiza-se a descarga diminuindo-se o valor da carga aplicada à ancoragem até se alcançar de novo o valor de patamar T_0 . Durante a carga e a descarga é necessário medir em cada um dos patamares de carga já executados anteriormente (T_{i-1}, T_{i-2}, \dots)

o conjunto de grandezas mencionadas, de forma a quantificar as deformações da ancoragem. Alcançado o valor de patamar T_0 inicia-se novo ciclo de carga e repete-se o procedimento descrito até estar cumprido todo o programa de ensaio (cf. fig.3).



Fig. 2 – Exemplo de plataforma de suporte ao ensaio de uma ancoragem (Santarém).

A medição dos deslocamentos da ancoragem e do muro é feita relativamente a um ponto fixo (referência), que se admite suficientemente afastado do muro para não ser afectado por eventuais deformações deste. A materialização deste ponto fixo, de importância vital para a qualidade das medições, coloca geralmente dificuldades de execução pelas razões já mencionadas anteriormente (ex. declive, altura do solo à plataforma, materiais, vegetação), às quais é necessário dar resposta adequada de forma a não comprometer a qualidade dos resultados do ensaio; igualmente problemáticas e merecedoras de atenção são as questões relacionadas com a excentricidade do actuador, das chapas de distribuição de carga e da célula de força e do posicionamento dos transdutores de deslocamento.

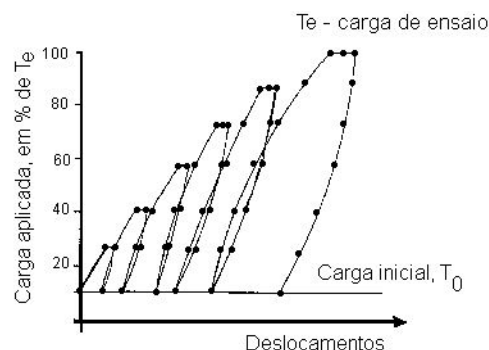


Fig. 3 – Procedimento de aplicação de carga num ensaio realizado segundo o método 1.

3. REQUISITOS DO SISTEMA DE MEDIÇÃO

De acordo com a norma EN1537 [2], o sistema de medição da força deve apresentar uma exactidão melhor que 2% do valor máximo de força a aplicar à ancoragem durante o ensaio. No caso de se pretenderem medir eventuais perdas de carga na ancoragem durante os patamares de fluência o sistema de medição deverá possuir uma resolução melhor que 0,5% da carga de ensaio. Segundo a mesma norma, durante a fase de fluência as medições dos deslocamentos devem apresentar uma resolução melhor que 10 μm e exactidão melhor que 50 μm ; fora dos patamares de fluência, a exactidão das medições deverá ser melhor que 500 μm .

4. DESCRIÇÃO DO SISTEMA DE ENSAIO DE ANCORAGENS

O sistema de ensaio é composto por um conjunto de sete sensores inteligentes (*“Smart-Sensor”*), ligados a uma unidade colectora de dados, através de uma rede de comunicação de dados do tipo digital, uma fonte de alimentação (para alimentação de todo o sistema de medição), uma consola portátil, dotada com uma bateria recarregável do tipo NiMH (200mA.h), um carregador de bateria (NiMH) e um

conjunto de cabos terminados com fichas para estabelecimento do meio físico de comunicação/transporte da alimentação aos sensores inteligentes (cf. fig. 4).

De um modo genérico, um sensor inteligente pode ser visto como a associação de um transdutor/sensor primário, como sejam uma célula de força, um codificador óptico ou um sensor de temperatura, com um dispositivo electrónico. Este dispositivo electrónico confere capacidades que vão além da simples conversão analógica digital do sinal, nomeadamente: o processamento digital de dados, de forma a valorizar a informação produzida; a realização de testes de diagnóstico, para detecção de eventuais anomalias; a calibração adaptativa para eliminação de possíveis perturbações externas sobre o sistema; e a comunicação bidireccional de dados com o exterior [3]. Assim, o dispositivo electrónico compreende o condicionador de sinal, o conversor analógico digital do sinal, a unidade central de processamento, a memória para armazenamento de parâmetros de configuração e armazenamento de dados adquiridos, e a interface de comunicação com o exterior. A unidade central de processamento terá a seu cargo, entre outras funções, o primeiro processamento de dados, a interpretação das mensagens recebidas e o seu processamento.

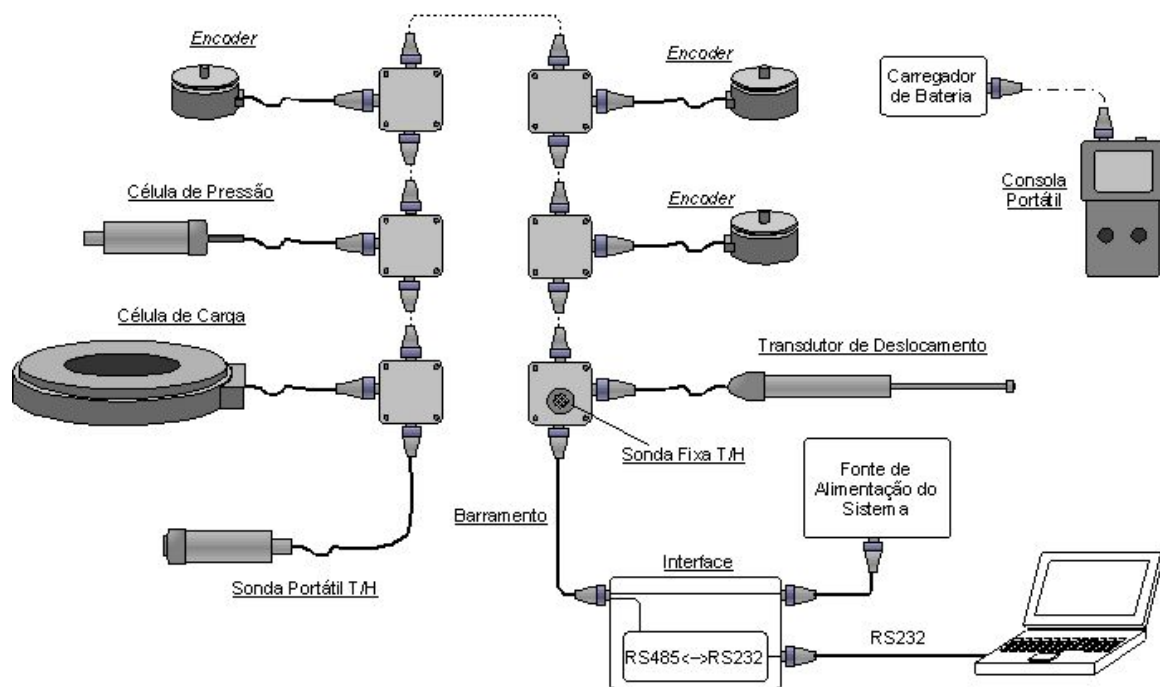


Fig. 4 – Principais componentes do sistema de medição para ensaios de ancoragens.

Nesta comunicação procurar-se-á descrever, em pormenor, o equipamento desenvolvido para a medição das grandezas mencionadas anteriormente, mais concretamente, o conjunto de sensores inteligentes, as suas principais funcionalidades e os aspectos relacionados com as interfaces mecânicas. No entanto, para que se possa ter uma ideia mais concreta acerca das funções desempenhadas por cada um dos subsistemas mencionados e da interligação entre si, importa fazer uma breve descrição acerca de cada um desses subsistemas.

A unidade colectora de dados compreende um sistema dedicado inteligente que tem como principais funções: 1) estabelecer toda a comunicação com os sensores inteligentes, através do envio de mensagens aos sensores inteligentes e recepção de respostas de acordo com um protocolo desenvolvido para o efeito; 2) processar os dados recebidos; 3) apresentar os dados processados num écran em formato gráfico e/ou numérico; 4) armazenar os dados numa unidade de memória não volátil; 5) exportar os dados para outros sistemas num formato compatível; e 6) interagir com o operador através de uma interface simples e adaptável às condições de trabalho. Na sua forma mais simples, esta unidade colectora de dados poderá ser um computador portátil dotado de uma interface de comunicação compatível com a da rede de dados do sistema (RS-485). Atendendo às condições de trabalho particulares normalmente encontradas em obra, optou-se por um sistema dedicado, de forma compacta, o qual integra, entre outras funcionalidades, um *touch screen* de alto brilho, diversas interfaces de comunicação e memória não volátil para armazenamento de dados.

A fonte de alimentação destina-se a alimentar todo o sistema de medição, incluindo a unidade colectora de dados e a rede de instrumentos. Esta fonte, com funcionamento normal através da tensão da rede (ou gerador - 230V_{CA}), dispõe, no entanto, de baterias que lhe conferem alguma autonomia e impedem que o sistema interrompa o seu normal funcionamento devido a uma falta temporária da tensão da rede. No caso da anomalia se prolongar no tempo, permite desencadear as acções necessárias com vista à salvaguarda dos dados adquiridos e da segurança do ensaio. O carregador destas baterias encontra-se acoplado à fonte de alimentação.

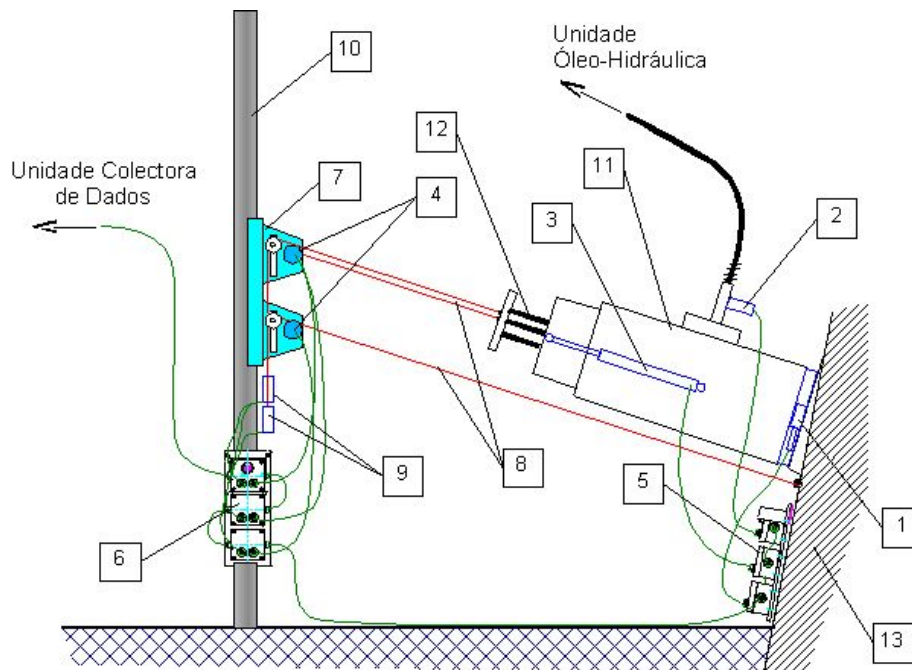
A consola portátil implementa um sub-conjunto das funcionalidades disponíveis através da unidade colectora de dados, as quais permitem comunicar com os sensores inteligentes através do envio de mensagens e recepção de respostas. Assim, através desta consola é possível efectuar medições e visualizar o resultado no visor LCD de que dispõe. A consola portátil destina-se a dois tipos de situações consoante o tipo de ligação adoptada: 1) ligação local – comunica apenas com o sensor a que está ligada e destina-se a monitorizar uma ou mais grandezas quando a unidade colectora de dados não se encontra no campo de visão (ex. acerto do zero do sensor na fase de montagem); e 2) ligação em rede – permite monitorizar uma ou mais grandezas de todos os sensores ligados à rede, sem ter de recorrer à unidade colectora de dados para comando dos sensores e visualização dos dados (ex: campanha de observação de ancoragens em que se mede apenas a força de tracção instalada). No caso da ligação ser local, a alimentação da consola é fornecida pelo sensor inteligente. No caso de ser em rede, a alimentação da consola assim como a alimentação dos sensores inteligentes é fornecida pela bateria que se encontra presente nesta.

Por último resta referir que o carregador de bateria destinado a carregar a bateria presente na consola também pode ser usado (em alternativa) como fonte de alimentação dos sensores inteligentes, no modo de tensão constante, embora com limitação de corrente (200mA). Como se depreende, a consola portátil assim como o carregador de bateria/fonte de alimentação foram desenvolvidos tendo em vista outro tipo de utilização do equipamento que não exclusivamente o de ensaios detalhados de ancoragens, proporcionando grande flexibilidade de adaptação a outras aplicações.

4.1. Sensores Inteligentes

Como já se referiu anteriormente, a instrumentação é presentemente composta por sete sensores inteligentes (cf. fig. 5). Cada sensor inteligente é constituído por um sensor primário e por um circuito electrónico que se encontra alojado no interior de uma caixa estanque com as dimensões 80x80x45 mm. Este circuito tem como principais funções: 1) gerar a tensão de excitação do sensor primário (elemento sensível à grandeza física); 2) efectuar o condicionamento de sinal; 3) efectuar a conversão analógica digital (AD) do sinal; 4) efectuar o primeiro processamento digital do sinal; e 5) estabelecer a comunicação com o exterior. Feita esta divisão de funções, não é de estranhar que os circuitos electrónicos desenvolvidos sejam idênticos para todos os sensores, registando-se diferenças, basicamente, nos subsistemas de geração da tensão de excitação do sensor primário, de condicionamento de sinal e de conversão analógica digital, os quais foram projectados tendo em vista o tipo e a especificidade de cada sensor primário. Após a conversão analógica digital do sinal, o processamento de dados, o armazenamento de dados em memória (de configuração e de medição) e a interface com o exterior são funções comuns a todos os sensores. Para a implementação das duas últimas funções foi escolhido um microcontrolador (ADuC824XS) que centraliza a gestão de toda a actividade do sensor inteligente, e, também, implementa a conversão analógica digital do sinal. O microcontrolador selecciona o espaço de memória não volátil destinado ao armazenamento de parâmetros de identificação/configuração genéricos e específicos de cada canal, onde se inclui a tabela de calibração usada na conversão dos dados adquiridos para as unidades da grandeza do canal em causa. Deste modo, os dados resultantes de uma medição podem ser fornecidos em unidades da grandeza medida ou, em alternativa, em unidades de aquisição; em qualquer dos casos, a resolução é de 16 bits (dois bytes por canal e por aquisição).

Cada um dos sensores dispõe de uma memória não volátil (32 kBytes) para armazenamento local de dados (caso se pretenda), indicado para ensaios de longa duração sem ligação permanente à unidade colectora de dados. Como características adicionais salienta-se que, à excepção da Sonda Portátil T/H, todos os restantes sensores inteligentes possuem um sensor de temperatura, localizado no interior da caixa que serve de alojamento ao circuito electrónico, o qual poderá ser usado para uma eventual correcção da deriva do conversor AD provocada pela variação da temperatura no interior da caixa. Para além disso, cada um dos sensores inteligentes implementa um conjunto de testes de diagnóstico que lhe permitem detectar e sinalizar eventuais anomalias.



Designação	Grandeza (Observações)
1 - Célula de carga	Força aplicada pelo actuador à ancoragem
2 - Sensor de pressão	Pressão instalada na câmara do actuador
3 - Sensor de deslocamento	Deslocamento da haste do actuador
4 - Encoders	Deslocamento da armadura e do muro
5 - Caixas de condicionamento	(Grupo de sensores do actuador)
6 - Caixas de condicionamento	(Grupo de sensores da armadura e muro)
7 - Suporte dos encoders	(Roldanas de suporte dos fios, ajustáveis em altura)
8 - Fios de INVAR	(Transferência dos pontos de medição dos encoders)
9 - Pesos 'activos'	(Aplicação de tracção constante nos fios e eliminação de atrito)
10 - Ponto fixo	(Estrutura considerada fixa para efeitos da medição de deslocamentos)
11 - Actuador óleo-hidráulico	
12 - Varões da armadura da ancoragem	
13 - Muro de suporte objecto de ancoragem	

Fig. 5 – Esquema simplificado da instalação do equipamento.

4.1.1 Força Axial

Este sensor inteligente faz uso de uma célula de força, do tipo extensométrico, com gama de medição adaptada à especificidade de cada ensaio. Ao longo do desenvolvimento deste sensor usou-se uma célula de força produzida pela empresa SYSGEO, modelo L211V100, com alcance de medição de 1000 kN. Na figura 6 encontra-se representado o diagrama de blocos do circuito electrónico deste sensor.

No desenvolvimento do sensor houve a preocupação de manter, tanto quanto possível, a separação entre a parte analógica e a parte digital, de forma a minimizar possíveis interferências desta sobre a primeira. Deste modo optou-se por usar três reguladores de tensão, dois do tipo linear, para a parte analógica, e um do tipo comutado para a parte digital. Este sensor dispõe de dois canais de aquisição – CH1 para medição da força axial – e CH2 – para medição da temperatura interior. A tensão de excitação do sensor primário é ajustada em função da corrente de excitação pretendida para o sensor. De

forma a minimizar o efeito do comprimento e tipo de cabo utilizado na ligação da célula de força assim como de eventuais variações da tensão de excitação do sensor primário, face à tensão de referência do conversor AD, optou-se por uma configuração em que a tensão de referência está directamente relacionada com a tensão de excitação, de modo que o efeito da primeira é anulado pela segunda. Além disso, actuando no ganho do amplificador (escala), existente no interior do microcontrolador, é possível interligar células de força com sensibilidades distintas sem provocar saturação.

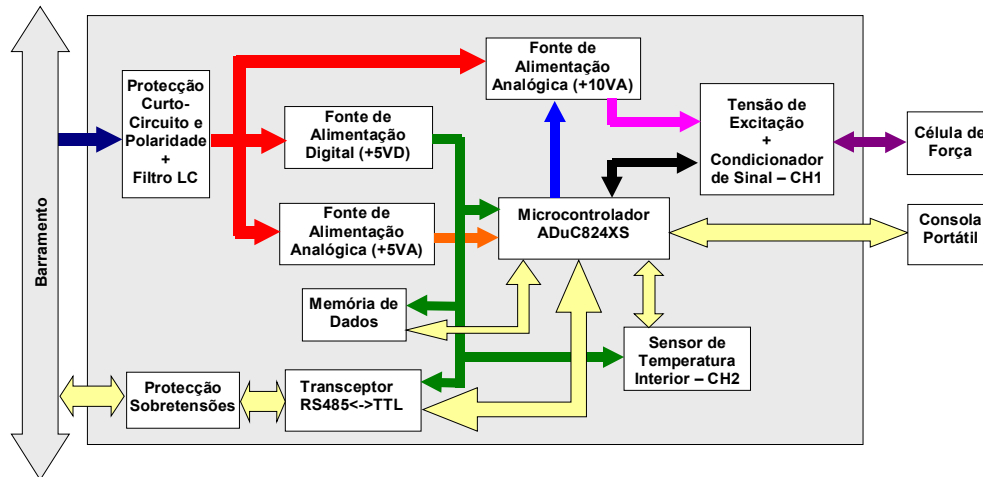


Fig. 6 – Esquema de blocos simplificado do sensor inteligente Força Axial.

O sensor de temperatura interior, de referência DS18B20Z, interage com o microcontrolador através de uma interface de comunicação do tipo *1-Wire*; o sinal de temperatura fornecido por este sensor já se encontra digitalizado, embora seja necessário efectuar o processamento de dados com vista à conversão para graus Celsius. Como já se fez breve referência, o sensor inteligente possui uma memória, não volátil, para armazenamento local de dados, vocacionada para aplicações de média/longa duração; neste caso, configurando o sensor inteligente para o modo de aquisição programada, o sensor executa, de forma autónoma, a aquisição e o armazenamento de dados na memória com indicação da hora. Posteriormente, os dados adquiridos podem ser importados e/ou eliminados desta memória.

4.1.2 Deslocamento da Haste do Actuador

Este sensor inteligente faz uso de um transdutor de deslocamento, do tipo potenciométrico, fabricado pela *Novotechnik*, modelo LWG300, com gama de medição de 300 mm e de um sensor de T/H, descrito no sub-capítulo 4.1.6. O diagrama de blocos do circuito electrónico desenvolvido para este sensor é idêntico ao do sensor Força Axial, descrito anteriormente, diferindo, basicamente, no número de canais. Assim, no CH1 é medido o deslocamento da haste do actuador, no CH2 a temperatura interior, no CH3 a temperatura ambiente e no CH4 a humidade ambiente. O sensor de T/H, encontra-se fixo no lado exterior da tampa da caixa deste sensor inteligente.

4.1.3 Pressão Hidráulica

Este sensor inteligente faz uso de uma célula de pressão, fabricado pela *Keller*, modelo PA-33/1000, com saída de sinal em corrente (4-20 mA) e gama de medição de 1000 bar. O diagrama de blocos do circuito electrónico é semelhante ao descrito para o sensor Força Axial diferindo, apenas, no que diz respeito ao condicionador de sinal. Neste caso, o sinal em corrente é convertido para tensão e só depois aplicado no conversor AD.

4.1.4 Deslocamento da Armadura da Ancoragem

Este sensor inteligente faz uso de um codificador óptico (*encoder*), produzido pela *Hengstler*, modelo RI58-O/5000, do tipo incremental e 5000 passos por volta, tendo acoplado ao seu eixo uma roldana com 25 mm de diâmetro. A transmissão dos deslocamentos da armadura da ancoragem ao *encoder* faz-se por intermédio de um fio *INVAR* com um diâmetro de 0,1 mm.

O fio de *INVAR* é mantido sob uma força de tracção constante por recurso a um peso activo com uma massa aproximada de 0,25 kg. O peso é constituído por duas partes, uma fixa ao fio e outra móvel, sendo possível imprimir um movimento relativo por acção de um electro-íman no seu interior. Este peso constitui, também, o mecanismo de eliminação das componentes de atrito estático existentes ao

nível das chumaceiras do *encoder* e da roldana de apoio do fio. Esta acção é conseguida colocando o peso em vibração, com amplitude e frequência configurável, de forma a transmitir essa vibração às chumaceiras. O comando do peso activo é realizado pelo microcontrolador do sensor inteligente.

Na figura 7 apresenta-se o diagrama de blocos deste sensor, onde se reconhecem alguns blocos comuns aos sensores já apresentados. Refira-se o desenvolvimento de um amplificador de potência (*driver*) para a excitação do peso activo, com protecção contra sobrecarga por intermédio de um fusível re-armável. Tendo em conta que o *encoder* é do tipo incremental, torna-se imprescindível a vigilância constante do estado das linhas de dados para não originar erros de medição cumulativos. Este pormenor torna-se mais crítico quando o peso activo se encontra no modo de vibração em que as transições de estado ocorrem com maior frequência. Algo semelhante acontece quando o microcontrolador é chamado a responder ao protocolo de comunicação ou se encontra ocupado na realização de outras tarefas, tornando-se inviável a monitorização de forma permanente do estado das referidas linhas. Deste modo optou-se por dotar o sistema com um microcontrolador dedicado exclusivamente a este fim. A comunicação entre os dois microcontroladores processa-se através de uma interface série e em modo síncrono. O sensor possui dois canais (CH1 – deslocamento e CH2 – temperatura interior).

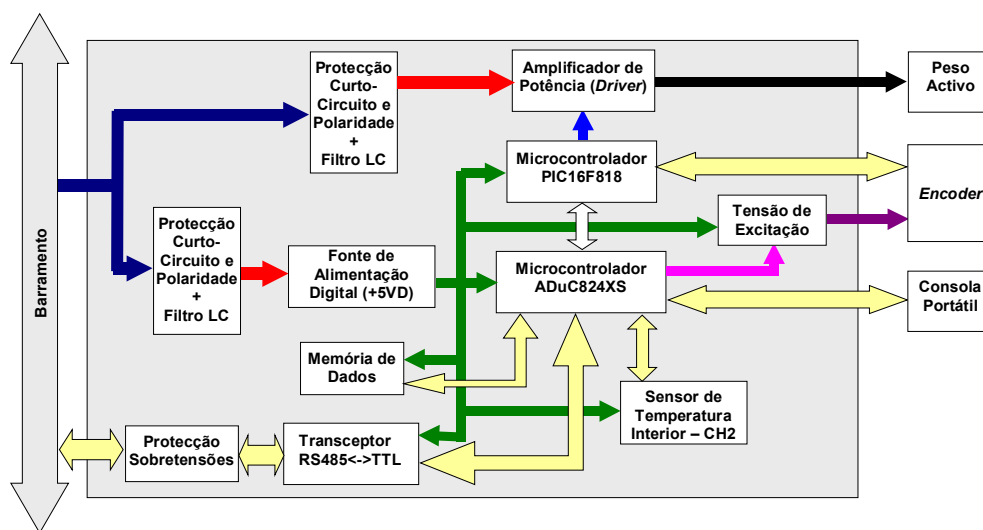


Fig. 7 – Esquema de blocos simplificado do sensor Deslocamento da Armadura da Ancoragem.

4.1.5 Deslocamento da Armadura da Ancoragem/Muro de Suporte

Estes dois sensores são idênticos ao descrito anteriormente diferindo apenas no modelo do encoder utilizado, RI36-O/3600, sendo a resolução neste caso de 3600 passos por volta.

4.1.6 Sonda Portátil de Temperatura/Humidade (T/H)

Este sensor inteligente, com a forma de um mini-torpedo, aloja numa das suas extremidades em contacto com o exterior, um sensor primário de T/H com a referência STH15, fabricado pela *Sensirion*. O sensor T/H disponibiliza ao microcontrolador um sinal de temperatura e humidade já em formato digital. A medição das duas grandezas faz-se em modo não simultâneo, devendo o microcontrolador enviar o respectivo comando ao sensor primário, de acordo com a grandeza que se pretende medir. Este sensor possui dois canais (CH1 – temperatura e CH2 – humidade) e é o único sensor inteligente que não possui um canal para a medição da temperatura interior.

4.2. Processamento de Dados

A conversão dos dados resultantes da aquisição para unidades da respectiva grandeza é efectuada tendo por base uma tabela de calibração, armazenada localmente em memória não volátil. Para o canal 1 (grandeza principal) o espaço reservado permite definir uma tabela até 51 pontos de calibração e para os restantes canais até 11 pontos. Cada ponto de calibração é definido por uma abcissa (valor de aquisição) e por uma ordenada (correspondente valor da grandeza), dois *bytes* cada. Juntamente com a tabela é possível armazenar também a temperatura de calibração (dois *bytes*) e a data de calibração (ano e mês).

O princípio de conversão baseia-se na interpolação linear, por troços, da curva de transferência do sistema de medição descrita pela tabela de calibração.

Dado que a realização de operações matemáticas em modo de vírgula flutuante envolvem o desenvolvimento de *software* de grande complexidade optou-se por implementar o processamento de dados com números inteiros. Como consequência, de modo a melhorar a resolução do sistema de medição, os valores das ordenadas da tabela de calibração devem ser multiplicados por um factor, de preferência múltiplo de 10, e correspondente indicação nas unidades (ex. 1005,37 kN passa a 10054 (kN x 10); 25,75 % passa a 2575 (% x 100)).

4.3. Rede de Comunicação

A interligação entre os diversos sensores inteligentes e a unidade colectora de dados realiza-se por intermédio de uma rede de campo (*Field-Bus*), partilhada por todos os sensores [4,5]. Esta rede constitui o meio físico de suporte à transferência da informação (canal de comunicação) e ao transporte da alimentação para os sensores. A rede de campo desenvolvida implementa três das sete camadas do modelo OSI (*Open Systems Interconnected*): física, de ligação e aplicação. Ao nível da camada física, o protocolo obedece à norma RS485, com transmissão de dados em série, modo assíncrono não simultâneo e bidireccional; relativamente à camada de ligação, o protocolo de comunicação baseia-se no modelo mestre-escravo (*Master/Slave*), com a unidade colectora de dados ou a consola portátil a desempenhar as funções de estação mestre e os sensores inteligentes as de estações escravo.

A topologia da rede implementada é a de barramento, com possibilidade de interligar até 253 sensores, independentemente da grandeza medida e sem ordem pré-definida. Para além disso, será também possível ligar na mesma rede dispositivos actuadores como por exemplo a válvula de comando da pressão do sistema de aplicação de carga. O meio físico usado na implementação da rede é constituído por um cabo com quatro condutores e blindagem, dos quais dois são usados no transporte da tensão de alimentação e os dois restantes para o estabelecimento do canal de comunicação. As linhas de comunicação de dados dispõem de um andar de protecção contra sobretensões.

4.4. Protocolo de Comunicação

A troca de informação entre a unidade mestre e cada um dos sensores inteligentes processa-se, sempre e por iniciativa da primeira, através do envio de uma *mensagem* e a recepção de uma *resposta* enviada pelo sensor inteligente. O envio de *mensagens* pode acontecer sob duas formas: endereçamento simples - dirigidas a um único sensor inteligente - ou a todos os que estejam ligados ao barramento - endereçamento múltiplo (*broadcast message*). A recepção de uma *mensagem* de endereçamento simples constitui a autorização de acesso ao canal de comunicação do sensor inteligente endereçado, a qual cessa após envio da *resposta* [5].

A identificação dos sensores inteligentes faz-se por intermédio de um endereço único, constituído por um *byte*. A lista dos possíveis endereços a atribuir é a correspondente aos 256 caracteres do código ASCII alargado, com excepção dos códigos 26h (carácter "&") e FFh, que são usados para endereçamento múltiplo e interrogação de endereço, respectivamente.

Uma *mensagem* começa sempre com um *byte* indicador de início de mensagem (código 80h), seguido de um *byte* relativo ao endereço do sensor inteligente endereçado (ou o carácter "&", no caso de endereçamento múltiplo) e de um *byte* relativo ao comando. Dependente do tipo de *mensagem*, esta poderá ainda conter um ou mais *bytes* de dados (máximo cinco). Independentemente do tipo de endereçamento e de se tratar de uma *mensagem* ou de uma *resposta*, todos os sensores inteligentes são receptores de toda a informação que circula no canal de comunicação.

O protocolo de comunicação assenta em 63 comandos, alguns dos quais são específicos de um tipo de sensor inteligente e como tal não se aplicam a todos os sensores (ex. configuração da frequência de vibração do peso activo). O conjunto de comandos pode-se dividir em vários subconjuntos: 1) configuração de parâmetros de funcionamento; 2) configuração de parâmetros de identificação e tabela de calibração; 3) activação/desactivação da tensão de excitação do sensor primário e do peso activo; 4) leitura de variáveis de estado; 5) medição de grandezas (canais e diagnóstico); 6) leitura dos dados da aquisição; 7) diagnóstico; e 8) diversos.

5. INTERFACES MECÂNICAS

Como já foi referido anteriormente pretende-se que o novo sistema melhore significativamente as condições de instalação e operação em obra. Para tal procedeu-se a um estudo aprofundado de diversos

métodos de fixação do equipamento, tendo em conta os materiais habitualmente disponíveis no local, a exiguidade do espaço disponível nas plataformas de trabalho, a necessidade de reduzir o número de ligações de cabos a realizar no local e as condições ambientais. Procurou-se, por um lado, minimizar o número e a complexidade das tarefas necessárias para a colocação do novo sistema em funcionamento, e por outro, minimizar os impactos negativos sobre a qualidade das medições na impossibilidade de montar o sistema em condições ideais face às condições impostas na obra.

Foram identificados dois grupos de grandezas a medir que interessava agrupar, devido à proximidade da instrumentação correspondente do ponto de vista físico durante o ensaio. Deste modo temos num dos grupos a força aplicada à ancoragem, a pressão aplicada na câmara do actuador e o deslocamento da haste do actuador, e no segundo grupo os transdutores do tipo *encoder*. A minimização da dimensão dos cabos e do atravancamento da zona de ensaio foram os principais factores que influenciaram a definição dos agrupamentos de sensores.

O transdutor de deslocamento do actuador é aplicado sobre este por recurso a um suporte compatível com a generalidade dos modelos de actuadores normalmente utilizados e fixado por intermédio de uma correia ajustável com roquete integrado. Na extremidade da haste do transdutor é instalado um mecanismo que permite posicionar correctamente, segundo a direcção radial e longitudinal do actuador, uma ponteira dotada de um magneto para fixação ao êmbolo do actuador (cf. fig. 8).

A cada um dos agrupamentos de sensores inteligentes corresponde um único suporte das caixas contendo os circuitos electrónicos. O suporte encontra-se dotado de diversas interfaces mecânicas compatíveis com elementos habitualmente presentes no local, podendo ser simplesmente suspenso de uma cavilha cravada no muro ou noutro tipo de estrutura de suporte improvisado com materiais existentes no local, ou fixada por braçadeira plástica à estrutura de suporte do ponto fixo ou outros elementos tubulares da cobertura habitualmente instalada para protecção (cf. fig. 9a).

Os três *encoders* são instalados em dois suportes independentes por forma a assegurar simultaneamente um posicionamento óptimo entre eles e relativamente aos pontos de medição, cobrindo uma gama alargada de ancoragens em termos do ângulo que estas fazem com a horizontal. A utilização de apenas dois suportes permite, também, minimizar o número e complexidade das operações de instalação. A remoção da componente vertical da força de tracção dos fios do eixo dos *encoders* é assegurada por uma roldana equipada com rolamento de esferas, ajustável em altura relativamente ao *encoder* correspondente para permitir o alinhamento com o eixo da ancoragem (cf. fig. 9b).



Fig. 8 – Pormenor da montagem do transdutor de deslocamento sobre o actuador.



Fig. 9a – Exemplo de fixação das caixas dos sensores sobre a estrutura da cobertura



Fig 9b - Suporte dos *encoders*. Pormenor da fixação à estrutura

O sensor de pressão é instalado directamente sobre a linha de alimentação do actuador por recurso a um dispositivo dotado de acessórios de engate rápido compatíveis com o maior parte dos sistemas de aplicação de carga utilizados.

6. RESULTADOS

A avaliação do desempenho do sistema de medição foi realizada através de ensaios de calibração e de campo.

6.1. Ensaios de Calibração

Com o apoio do Laboratório de Apoio Metrológico (LCAM) e do Laboratório Metrológico de Forças (LMF) do LNEC, submeteram-se os sensores inteligentes a ensaios prévios de calibração tendo como objectivos a determinação da função de transferência da cadeia de medição do sensor (usada para gerar a tabela de calibração), a avaliação da estabilidade e da repetibilidade dos valores adquiridos.

Os resultados obtidos foram considerados adequados à aplicação, principalmente, tendo em conta os requisitos impostos à partida; assim, numa primeira análise pensamos que o sistema de medição desenvolvido satisfaz plenamente os requisitos impostos em termos de erro de exactidão, repetibilidade e estabilidade das medições. Aguarda-se para breve a emissão dos certificados de calibração emitidos pelos laboratórios mencionados.

6.2. Ensaio de Campo

Terminada a fase de calibração procedeu-se a um ensaio de campo para efectuar um levantamento das dificuldades encontradas *in loco* e com base nesse levantamento definir procedimentos de instalação do equipamento de medição de forma a minimizar eventuais erros de medição resultantes de uma instalação deficiente. Este ensaio também serviu para fazer um estudo comparativo entre este sistema de medição e o sistema de medição que tem sido usado pelo LNEC nos ensaios de ancoragens. Assim, em Junho de 2005, instrumentou-se uma ancoragem numa obra de suporte em Santarém, com os dois sistemas de medição e procedeu-se à realização do ensaio. Neste ensaio não foi possível medir a pressão do circuito óleo-hidráulico devido a incompatibilidades dos acessórios de ligação da célula de pressão; também não foi possível medir a força de tracção aplicada à ancoragem com o novo sistema por não ser possível garantir a inexistência de perturbações sobre os resultados do ensaio. Deste modo, apenas foi possível registar os deslocamentos da ancoragem, do muro e da haste do actuador, a temperatura e a humidade ambiente e as temperaturas interiores de todos os sensores inteligentes. Apesar das limitações e dificuldades encontradas na montagem dos dois sistemas em simultâneo, os resultados obtidos com o sistema automático (cf. fig. 10) revelam semelhança de valores com o sistema tradicional.

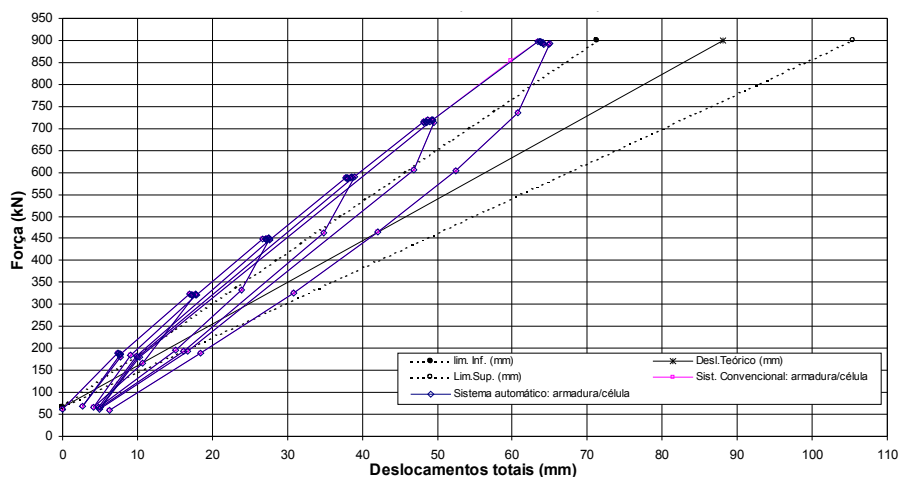


Fig. 10 – Ensaio de recepção detalhada (ERD) - tracções/deslocamentos totais

Relativamente aos deslocamentos da armadura apresenta-se uma análise comparativa dos deslocamentos obtidos em dois cordões da armadura (cf. fig. 11). Os dois pontos de leitura dos deslocamentos da armadura foram realizados com os *encoders* 1 e 2. O *encoder* 1 foi colocado no cordão superior e o *encoder* 2 foi colocado no cordão inferior, diametralmente oposto ao cordão associado ao *encoder* 1.

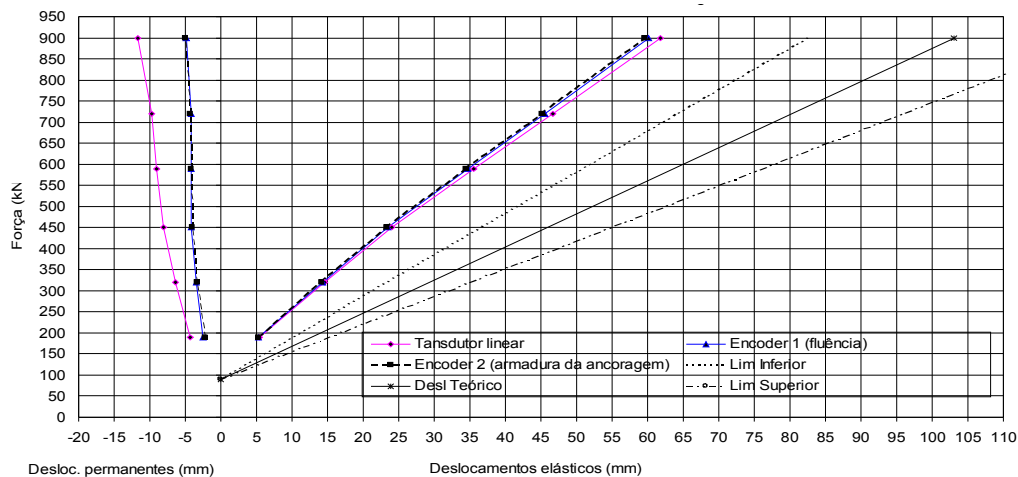


Fig. 11 – Ensaio de recepção detalhada: comparação da evolução das tracções/deslocamentos permanentes e elásticos nos sensores

Como se pode verificar existem algumas diferenças nos deslocamentos obtidos com os dois *encoders*. As razões que podem estar na diferença dos valores obtidos nos dois *encoders*, 1 e 2, durante os ciclos de carga/descarga podem estar relacionadas com os factores seguintes:

- 1 – deformação não homogénea da mesa, nomeadamente para as cargas mais elevadas;
- 2 – ocorrência de temperaturas elevadas durante o ensaio e variação da temperatura e da viscosidade do óleo do macaco;
- 3 – movimentos relativos das peças do actuador;
- 4 – folgas do sistema de pré-esforço;
- 5 – diferenças de tensão ao nível do bolbo de selagem, no que se refere à secção transversal.

7. CONCLUSÕES

Procedeu-se à descrição de um sistema de medição para ensaio de ancoragens, desenvolvido com o objectivo de automatizar as leituras e registo de dados dos ensaios. O novo sistema foi concebido tendo em conta um conjunto alargado de critérios e as necessidades específicas dos ensaios de ancoragens.

Os ensaios e verificações realizadas com o equipamento, até à data, permitem concluir que os objectivos inicialmente propostos foram completamente satisfeitos, nomeadamente os requisitos impostos pela norma EN1537.

8. REFERÊNCIAS

- [1] Carvalho, Mariana A.R., Salgado, Francisco M., “Análise Comportamental Estática e Dinâmica de Estruturas Ancoradas - Relatório nº 3 do progresso de trabalhos até Novembro de 2004”, Relatório 372/04-NFTOS/DG, LNEC, Lisboa, Novembro de 2004.
- [2] CEN EN1537:1999 E, “Execution of Special Geotechnical Work – Ground Anchors”, Dezembro de 1999.
- [3] Johnson, Robert N., “Building Plug-and-Play Networked Smart Transducers”, Sensors Magazine, October, 1997.
- [4] Santos, C. Almeida, Costa, C. Oliveira, “Estudo Comparativo de Algumas Redes de Campo”, Relatório 359/01-CPCE, LNEC, Lisboa, Dezembro de 2001
- [5] Santos, C. Almeida – “Automatização dos Ensaios de Carga Vertical em Estacas de Fundações”, Tese de mestrado, Universidade Técnica de Lisboa, IST, Lisboa, Outubro de 2001;