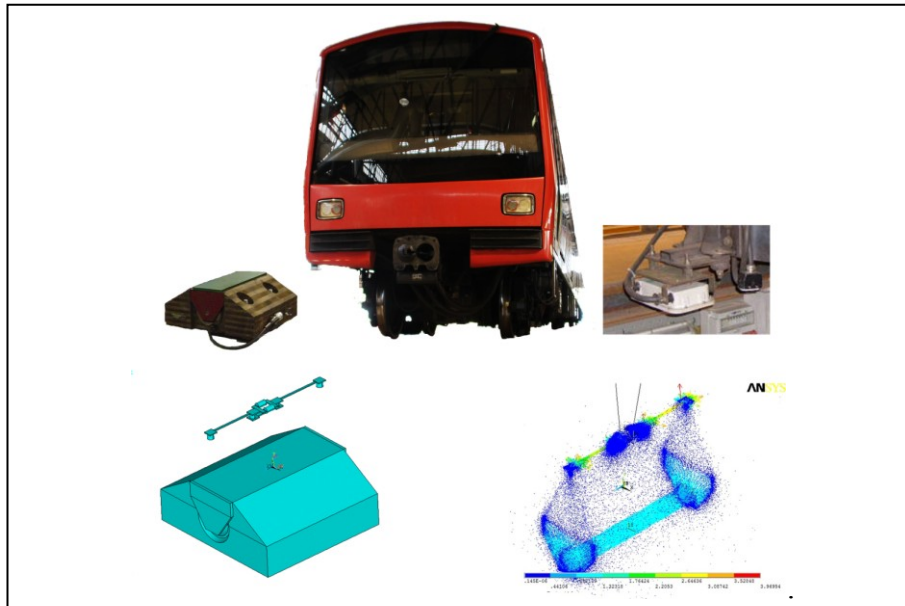




ISEL

INSTITUTO SUPERIOR DE ENGENHARIA DE LISBOA

**Área Departamental de Engenharia de Sistemas de Potência e
Automação**



Modelização de um Dispositivo de Travagem Automático de Via, através do Método dos Elementos Finitos

JOAO MIGUEL GUEDES COELHO
(Licenciado)

Dissertação para obtenção do grau de Mestre
em Engenharia Eletrotécnica – Ramo Energia

Orientador (es):

Doutor Carlos José Lourenço Quadrado
Mestre Ricardo Jorge Ferreira Luis)

Júri:

Presidente: Doutor Jorge Alberto Mendes de Sousa

Vogais:

Doutor José Carlos Lourenço Quadrado
Mestre Ricardo Jorge Ferreira Luis
Mestre Sérgio Abrantes Machado

Dezembro de 2012)

RESUMO

Apresenta-se a modelização, através do Método dos Elementos Finitos, de um sistema de proteção automática de comboios, denominado DTAV – Dispositivo de Travagem Automático de Via. A modelização é realizada com o auxílio do *software Ansys 13.0*

Descreve-se a evolução histórica dos sistemas de proteção automática de comboios, desde a época vitoriana até à atualidade. São categorizados os vários tipos de sistemas de proteção existentes, consoante as suas funcionalidades e os seus princípios físicos de funcionamento. É apresentada uma breve descrição da normalização em vigor, aplicada aos sistemas de proteção automáticos de comboios.

Descreve-se em pormenor o sistema DTAV, nomeadamente a sua funcionalidade, o seu princípio físico de funcionamento e o conjunto de equipamentos de que é constituído.

Apresenta-se uma breve introdução sobre o método dos elementos finitos, enquadrando o modelo criado com os princípios físicos em que se fundamenta, nomeadamente através da descrição das equações de eletromagnetismo.

Desenvolve-se modelo do sistema DTAV, evidenciado as etapas da construção e os resultados obtidos, validados por um conjunto de especificações e ensaios prévios realizados em laboratório.

PALAVRAS-CHAVE

Método dos Elementos Finitos; Proteção Automática de Comboios; DTAV

ABSTRACT

It presents the modeling, through the Finite Element Method, of a automatic train protection system, called. The modeling is performed with the aid of the software Ansys 13.0.

It describes the historical evolution of automatic train protection systems, from the Victorian era to the present day. It is categorized the various types of existing protection systems, depending on their features and their physical principles of operation. It briefly describes the existing standards, applied to the automatic train protection systems.

It describes in detail the DTAV system, including its functionality, its physical principle of operation and equipment that is constituted.

It presents a brief introduction to the finite element method, fitting the model created with the physical principles on which is based, including the description of the equations of electromagnetism.

It is developed the model DTAV system, evidenced stages of construction and the obtained results, validated by a set of specifications and preliminary tests carried out in laboratory.

KEYWORDS

Finite Element Method; Automatic Train Protection; DTAV

AGRADECIMENTOS

Gostaria de agradecer aos orientadores desta dissertação, o Sr. Prof. Dr. Carlos Quadrado e ao Sr. Prof. Eng.º. Ricardo Luis, ambos do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa – ISEL, pelo apoio e confiança que depositaram em mim. Em especial, um voto de profundo apreço, ao Eng.º. Ricardo Luis pela forma como me incentivou a prosseguir, mesmo nos momentos de maior dificuldade, onde o desânimo aparece e a esperança desvanece.

Agradeço igualmente a todos os meus colegas de trabalho do Metropolitano de Lisboa E.P.E, pelo contributo e apoio técnico que me facultaram, nomeadamente ao Sr. Eng.º. José Pina, pelo dispêndio de tempo que teve comigo nos ensaios de laboratório, aos mestres eletricitas Sr. Fernando Alves, Sr. Alexandre Rodrigues, Sr. Paulo Gomes e Sr. David Lopes que, juntamente com os restantes técnicos de sinalização, ajudaram-me na compreensão do funcionamento do sistema DTAV, não só com os ensaios efetuados, como também na construção do suporte de medição.

Um agradecimento especial ao Sr. Eng.º. Carlos Gomes, pelo constante incentivo que me deu, não só em apoio moral, como também, na autorização que me concedeu, para que, em alguns momentos do período laboral, me pudesse dedicar ao estudo e compreensão do sistema DTAV, em detrimento de alguns deveres subjacentes à função que desempenho. Adicionalmente, agradeço aos meus amigos e familiares, pela compreensão da minha ausência em alguns momentos importantes.

Dedico este trabalho ao meu pai, já falecido, à minha mãe, e ao Universo, pela persistência e inspiração que me incutiram, balizados pelos mais nobres ideais.

LISTA DE SÍMBOLOS

\bar{H}	Vetor Intensidade do Campo Magnético
\bar{J}	Vetor Densidade de Corrente Total
\bar{J}_s	Vetor Densidade de Corrente Aplicada
\bar{J}_e	Vetor Densidade de Corrente de Fuga (<i>Eddy</i>)
\bar{D}	Vetor do Fluxo Elétrico (Corrente de Deslocamento)
\bar{E}	Vetor da Densidade do Campo Elétrico
\bar{B}	Vetor da Densidade de Fluxo Magnético
$[\nu]$	Matriz de Relutância Magnética
ν_0	Relutância Magnética no Vácuo
$[\sigma]$	Matriz de Condutibilidade Elétrica
$[\epsilon]$	Matriz de Permissividade Elétrica
\bar{v}	Vetor de Velocidade
\bar{A}	Vetor Potencial Magnético
\bar{V}	Potencial Elétrico Escalar

ABREVIATURAS

DTAV	Dispositivo de Travagem Automático de Via.
ATP	Automatic Train Protection
ATC	Automatic Train Control
Cdv	Circuito de via
ERTMS	European Railway Train Management System
ETCS	European Train Control System
Gabarit	Secção envolvente do material circulante, que define o seu limite de ocupação, na via
RAMS	Acrónimo que significa Fiabilidade, Disponibilidade, Manutibilidade e Segurança
<i>Train-Stop</i>	Função de travagem automática de comboios existentes nos sistemas de proteção
<i>Signallmen</i>	Nome dado aos primeiros operadores dos caminhos-de-ferro ingleses
ML	Metropolitano de Lisboa
APDL	Application Parametric Design Language
AWS	Automatic Warning System
ADIF	Administrador de Infraestruturas Ferroviárias
RENFE	Red Nacional de Ferrocarriles Español
KVB	Controle de Vitesse à Balise
TVM	Transmission Voie Machine
ATP	Automatic Train Protection
ATC	Automatic Train Control
ATO	Automatic Train Operation
SIL	Safety Integrity Level
GSM-R	Global System for Mobile Communications – Railway

UGTMS Urban Guided Transport Management System
MODURBAN Modular Urban Guided Rail System

CONVENÇÕES

1 – BIBLIOGRAFIA

Neste trabalho, as referências bibliográficas são realizadas de acordo com a norma portuguesa em vigor, NP 405-1.1994. As referências, são apresentadas na bibliografia, segundo a ordem da primeira invocação no texto.

Utilizam-se abreviaturas nos seguintes casos: nomes próprios de autores, e editores literários; títulos de publicação em série, de acordo com a NP 139; palavras e termos utilizados nas referências bibliográficas de acordo com a NP 3680.

2 – SISTEMAS DE UNIDADES DE MEDIDA

Neste documento é utilizado o Sistema Internacional de Unidades de Medida (S.I.).

3 – UTILIZAÇÃO DE ESTRANGEIRISMOS

São utilizados estrangeirismos nas palavras que se encontram enraizadas na linguagem comum, ou quando o seu significado técnico se perderia quando traduzidas para a língua portuguesa, e.g. *software*, *train-stop*.

ÍNDICE

1	Introdução	2
1.1	Objetivos da dissertação.....	2
1.2	Motivação do trabalho	3
1.3	Enquadramento do trabalho	3
1.4	Estrutura da tese	4
2	Sistemas Automáticos de Travagem	6
2.1	Evolução histórica.....	6
2.2	Sistemas de travagem automáticos da atualidade	14
2.3	Normalização de segurança ferroviária.....	16
2.4	Interoperabilidade Europeia (ERTMS).....	18
2.5	Projetos de especificações em redes ferroviárias urbanas	20
2.6	Conclusões	22
3	Descrição do Sistema DTAV	24
3.1	Equipamento de Via.....	24
3.2	Equipamento de Bordo.....	26
3.3	Conclusão.....	33
4	Método dos Elementos Finitos.....	36
4.1	Introdução	36
4.2	Aplicação do MEF ao Modelo DTAV	38
4.3	Conclusão.....	43
5	Modelização do Sistema DTAV	46
5.1	Ensaio Prévios	47
5.2	Análise da Condição Proibitiva do DTAV	50
5.2.1	Análise da interação baliza-captor	64

5.3	Análise da Condição Permissiva do DTAV	71
5.4	Conclusão	73
6	Conclusões	76
6.1	Considerações finais.....	76
6.2	Perspetivas de desenvolvimento futuro	78
	Referências Bibliográficas	82
	Anexo 1 – Análise Magnetoestática.....	86

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1	<i>Signallmen</i> do séc. XIX (extraído de [1]).....	6
Figura 2.2	Sistema de telégrafo do século XIX utilizado em linhas ferroviárias (extraído de [1]).....	7
Figura 2.3	Sistema crocodilo (extraído de [3]).....	8
Figura 2.4	Escova metálica do sistema crocodilo (extraído de [4]).....	9
Figura 2.5	<i>Train Stop</i> mecânico (extraído de [4])	9
Figura 2.6	Sistema AWS (extraído de [5])	10
Figura 2.7	Sistema ASFA (extraído de [6]).....	11
Figura 2.8	Sistema KVB (extraído de [7]).....	13
Figura 2.9	Cabine de um comboio com o sistema TVM (extraído de [7]).....	13
Figura 2.10	Princípio de funcionamento de um cdv	14
Figura 2.11	ERTMS nível 1 (extraído de [10])	19
Figura 2.12	ERTMS nível 2 (extraído de [10])	19
Figura 2.13	ERTMS nível 3 (extraído de [10])	20
Figura 3.1	Constituição do sistema DTAV.....	24
Figura 3.2	Baliza de DTAV	25
Figura 3.3	Baliza fixa	25
Figura 3.4	Cofre de DTAV	26
Figura 3.5	Captor do comboio	26
Figura 3.6	Princípio de funcionamento do captor (extraído de [13])	27
Figura 3.7	Interior do Captor	28
Figura 3.8	Cofre de Aparelhagem.....	29
Figura 3.9	Placas ALCO e STAB.....	30
Figura 3.10	Placas INNE A/B e ULTR	30
Figura 3.11	PLACAS INPO3 E AMIP 2.....	31

Figura 3.13	Painel de Comando e Controlo	32
Figura 4.1	Discretização de um sistema contínuo.....	37
Figura 4.2	Fases do Método dos Elementos Finitos (extraído de [21])	38
Figura 4.3	Regiões de campo eletromagnético (extraído de [17]).....	41
Figura 4.4	Formato do elemento Solid237 (extraído de [22])	42
Figura 5.1	Zona de Influencia do campo magnético estático da baliza (extraído de [23])	46
Figura 5.2	Zona de influência da condição permissiva da baliza (extraído de [23]) ..	47
Figura 5.3	Ensaio do captor fora da zona de influência da baliza	48
Figura 5.4	Sinal elétrico presente nas bobinas de núcleo saturável	49
Figura 5.5	Ensaio do captor sobre a influência da baliza.....	49
Figura 5.6	Ensaio de medição do campo magnético da baliza de DTAV.....	50
Figura 5.7	Constituição da baliza de DTAV	51
Figura 5.8	Representação esquemática da relação entre diferentes tipos de materiais magnéticos e suas dimensões equivalentes (extraído de [25])	53
Figura 5.9	Modelo geométrico constituído pela baliza e a sonda.....	55
Figura 5.10	Malha de elementos finitos do modelo Baliza-sonda.....	56
Figura 5.11	Campo magnético ao longo de 0.305m a 0.120m da baliza	58
Figura 5.12	Medições de campo magnético efetuados experimentalmente a distâncias entre 0.120m e 0.200m de distância da baliza	59
Figura 5.13	Distribuição do campo magnético utilizando sonda transversal	60
Figura 5.14	Gráfico vetorial do campo magnético no interior da baliza	61
Figura 5.15	Superfície com um campo magnético de 0.0013T	62
Figura 5.16	Ensaio dinâmico do sistema DTAV com um comboio a circular a uma velocidade de 16,7 m/s	63
Figura 5.17	Modelo geométrico do captor.....	64
Figura 5.18	Tensão aos terminais das bobines captoras, fora da influência da baliza..	66

Figura 5.19	Distribuição do campo magnético na interação baliza – captor.....	67
Figura 5.20	Tensão aos terminais das bobinas captoras, sobre influência da baliza	68
Figura 5.21	Interação magnética baliza-captor para um deslocamento de 0,2125m....	69
Figura 5.22	Direção do campo magnético no captor	70
Figura 5.23	Elementos do modelo utilizados na simulação da condição permissiva...	71
Figura 5.24	Ensaio das bobinas captoras a 475mm de distância	72
Figura 5.25	Tensão induzida nos terminais das bobinas captoras deslocadas 0.475m.	73

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 2.1	Velocidades admissíveis num sistema ASFA (extraído de [6]).....	12
Tabela 2.2	Tipos de transmissão (extraído de [3]).....	15
Tabela 2.3	Princípios físicos de transmissão (extraído de [3])	15
Tabela 2.4	Funcionalidades dos sistemas de proteção (extraído de [3]).....	15
Tabela 2.5	Níveis de Risco (extraído de [9])	17
Tabela 2.6	Níveis de segurança SIL (extraído de [9]).....	17
Tabela 2.7	Níveis de automação UGTMS (extraído de [11])	21
Tabela 2.8	Subsistemas MODURBAN (extraído de [12]).....	21
Tabela 3.1	Condições de funcionamento do DTAV	28

CAPÍTULO 1

INTRODUÇÃO

Resumo

É apresentada uma descrição dos objetivos e motivação do trabalho, enquadrado na experiência profissional do autor. É igualmente descrita qual a estrutura adotada no trabalho e a referência às ferramentas utilizadas.

1 INTRODUÇÃO

O Método dos Elementos Finitos – MEF, tem revelado nas últimas décadas, uma crescente importância e contributo na modelização de sistemas nas diversas áreas de conhecimento. A possibilidade de projetar e simular sistemas complexos, permitiu uma significativa redução nos custos desenvolvimento de sistemas. À medida que os softwares de MEF evoluem, tornando a sua utilização cada vez mais acessível, a sua aplicabilidade expande-se para novas especialidades. É o caso do sector dos transportes ferroviários, de onde se destaca no presente trabalho, os sistemas de proteção automáticos de comboios. Dadas as exigências funcionais e de segurança exigidas atualmente a estes tipos de sistemas, o MEF apresenta-se como uma ferramenta de grande utilidade no projeto de novos sistemas de proteção de comboios. Mas a utilidade dos MEF não fica restrita ao projeto e desenvolvimento de novos sistemas. Existem atualmente vários sistemas de proteção automáticos de comboios que, apesar de não terem sido desenvolvidos de raiz com o auxílio do MEF, dada a sua importância funcional e longevidade demonstradas, apresentam uma mais-valia no conhecimento do seu funcionamento, se forem simulados total, ou parcialmente. É o caso do sistema DTAV- Dispositivo de Travagem automático de Via, em funcionamento no Metropolitano de Lisboa E.P.E, desde a década de 70. Tratando-se de equipamentos com funções de segurança e com um tempo de vida útil mínimo de 20 anos, torna-se relevante o seu conhecimento mais aprofundado do seu funcionamento, por parte dos responsáveis de manutenção, permitindo uma melhor compreensão de quais os seus limites de funcionamento, dentro dos parâmetros de segurança exigidos.

1.1 Objetivos da dissertação

O trabalho apresentado nesta dissertação situa-se no âmbito da modelização de sistemas através do MEF, tendo os seguintes objetivos principais:

Apresentar uma breve descrição da evolução histórica dos sistemas de proteção automáticos de comboios, no que se refere ao tipo de funcionalidades, aos princípios físicos de funcionamento, e à normalização associada em atualmente em vigência.

Descrever, o funcionamento do sistema DTAV, nomeadamente o princípio físico de transmissão via-bordo e os equipamentos de que é constituído.

Apresentar uma breve descrição do método dos elementos finitos, de forma a enquadrar o presente trabalho à sua base científica, nomeadamente às equações físicas do eletromagnetismo.

Modelizar, através de um software de MEF, o princípio físico de funcionamento do DTAV, associado à interação magnética Baliza-captor.

Validar os resultados obtidos, através da comparação dos mesmos com os ensaios experimentais e com as especificações do fabricante.

1.2 Motivação do trabalho

A escolha do tema do presente trabalho, e à sua posterior colocação á consideração do corpo docente, responsável pela orientação do mesmo, teve como base dois motivos principais. O primeiro prendeu-se com a vontade de aplicar o conjunto de competências técnicas que mais me cativaram, dentro do vasto leque oferecido pelo curso, nomeadamente, a modelização de sistemas através do método dos elementos finitos. O segundo motivo teve a ver com a imposição que fiz a mim próprio, que o trabalho a desenvolver deveria ter utilidade, nomeadamente, na área de conhecimento, que atualmente a vida me levou a interagir profissionalmente, o da Sinalização Ferroviária. Da reflexão destes dois fatores surgiu a ideia de modelizar o sistema DTAV – Dispositivo de Travagem Automático de Via.

1.3 Enquadramento do trabalho

Este trabalho enquadra-se no âmbito da conclusão do curso de Mestrado em Engenharia Eletrotécnica – Ramo Energia, do Instituto Superior de Engenharia de Lisboa – ISEL. Adicionalmente, permite um aprofundamento do conhecimento sobre o sistema de proteção automática de comboios, existente no ML. Foi escolhido o *software Ansys 13.0* sendo que, o motivo da escolha, deveu-se ao facto de este já ter sido utilizado na disciplina de Projeto de Máquinas Elétricas, do presente curso de Mestrado, o que

facilitou no processo de familiarização ao software. Dadas as especificidades do projeto, foi necessária a utilização da componente de programação *APDL – Application Parametric Design Language*. Apesar de apresentar um ambiente de trabalho menos intuitivo que a versão *workbench* do Ansys, permitia não só análise magnetostática, como também a análise transitória.

1.4 Estrutura da tese

O documento de dissertação é composto por seis capítulos e um anexo, com o objetivo de apresentar uma ordenação progressiva da evolução do trabalho.

Tendo sido apresentados os objetivos, a motivação e o enquadramento do trabalho, no presente capítulo, é realizada, no segundo capítulo, uma introdução histórica sobre evolução dos sistemas de proteção automáticos de comboios, desde os seus primórdios até à atualidade, não esquecendo a referência à normalização em vigor.

O terceiro capítulo apresenta, de forma aprofundada o sistema DTAV – Dispositivo de Travagem Automático de Via, descrevendo o seu princípio de funcionamento e o conjunto de equipamentos de que é constituído.

No quarto capítulo é realizada uma apresentação genérica do método dos elementos finitos, sendo posteriormente descrita a fundamentação teórica em que o software de simulação se sustenta, nomeadamente, as equações físicas de eletromagnetismo, subjacentes ao modelo a ser desenvolvido.

No quinto capítulo é descrito o processo de desenvolvimento do modelo propriamente dito. Tendo por base um conjunto de especificações a que o modelo se propunha cumprir, são apresentados os diferentes passos tomados, na construção do modelo e os consequentes resultados alcançados.

O sexto e último capítulo é dedicado à apresentação das considerações finais do trabalho e das perspetivas de desenvolvimento futuro.

Em anexo apresenta-se, a título exemplificativo, o código fonte, em linguagem APDL, do modelo de análise magnetostática, efetuado no presente trabalho. Dada a extensão do código fonte das análises transitórias, estas são disponibilizadas apenas no suporte informático, a acompanhar o presente trabalho.

CAPÍTULO 2

SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE TRAVAGEM

Resumo

O presente capítulo pretende dar uma visão global da evolução dos sistemas de proteção automáticos de veículos ferroviários, desde os seus primórdios até aos dias de hoje. Apresenta também a normalização mais relevante atualmente em vigor.

2 SISTEMAS AUTOMÁTICOS DE TRAVAGEM

2.1 Evolução histórica

Nos primeiros anos de existência do caminho-de-ferro, (meados do século XIX), o meio de garantir a segurança do movimento dos veículos ferroviários baseava-se no princípio de intervalo de tempos. Cada comboio só podia iniciar um percurso entre duas estações a partir uma determinada hora pré-estabelecida. Esses intervalos eram calculados mediante o conhecimento do tempo médio de percurso de um comboio, de uma estação à outra. Assim, o veículo só iniciaria a sua marcha depois de ter sido dado tempo suficiente para que o veículo da frente tivesse percorrido todo o trajeto. A gestão e supervisão da circulação dos mesmos eram realizadas pelos *Signalmen*, nome inglês dado aos agentes de tráfego (vulgo chefe de estação) daquela época. Além de darem as ordens de partidas dos comboios, utilizando bandeirolas, ou acionado sinais instalados ao longo da via, eram também responsáveis pela manobra das agulhas, nas zonas de inversão, ou mudança de via. A figura 2.1 ilustra um retrato de um agente de tráfego, da época vitoriana. Este sistema foi eficaz enquanto o tráfego de uma determinada via era reduzido.

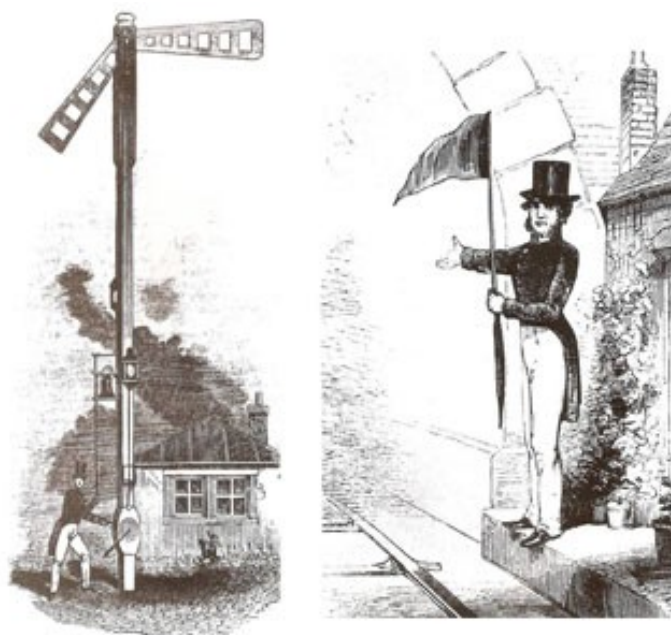


Figura 2. 1- Signallmen do séc. XIX (extraído de [1])

À medida que os intervalos de tempo se encurtavam, devido à crescente necessidade de transporte, advento do crescimento económico daquela época (revolução industrial), começaram a emergir as limitações desta filosofia. Bastaria que um comboio se atrasasse, ou avariasse durante o percurso, para que aumentasse o risco de colisão entre esse comboio e o que o precedesse. Dadas as limitações na capacidade de travagem de veículos que circulam em ferrovia, aliada ao crescente aumento de velocidade dos mesmos, ao facto de poderem circular em condições climatéricas adversas (nevoeiro, período noturno, chuva...) e à capacidade de reação de um operador de comboios, a ocorrência de acidentes foi inevitável. Segundo [2], entre 1830 e 1900, foram registados 74 acidentes, só no Reino Unido, alguns dos quais com vítimas mortais.

O passo seguinte, dado na proteção da circulação dos comboios, surgiu com o aparecimento do telégrafo elétrico (Figura 2.2). A partir de 1840 começaram a ser instalados estes equipamentos nas linhas inglesas, que permitiam a comunicação entre os agentes de tráfego de diferentes estações. Desta forma, só era dada a autorização de início de marcha a um comboio quando o operador recebesse a informação, por parte do operador da estação seguinte, que o último comboio já tinha chegado ao fim do percurso. Foi assim, que surgiu o conceito de bloco absoluto fixo, ou cantão, que consiste num troço de via no qual só é permitido a permanência de um comboio de cada vez.

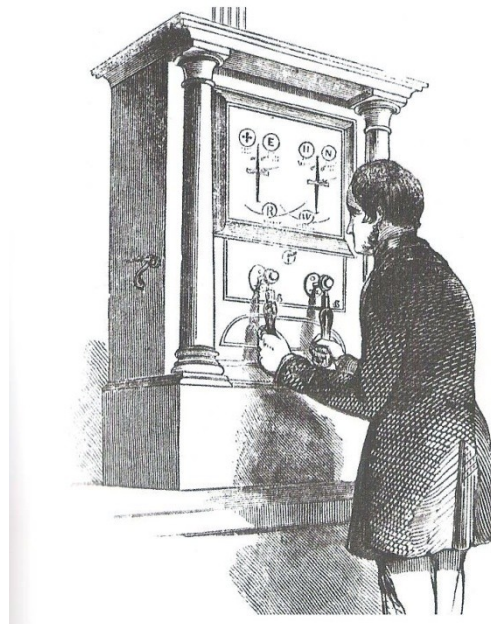


Figura 2.2 – Sistema de telégrafo do século XIX utilizado em linhas ferroviárias (extraído de [1])

Uma nova evolução deu-se com o aparecimento dos sistemas automatizados de proteção e aviso de comboios. Estes sistemas tinham como objetivo informar o operador do comboio do estado de um determinado sinal vertical, através de uma indicação sonora no interior da cabine. Em acréscimo, se o operador não reagisse atempadamente, o comboio seria automaticamente travado. Um dos sistemas de proteção mais antigos é o denominado *Le Crocodile*, utilizado desde o início do século XX pelas redes ferroviárias francesas, belgas e do Luxemburgo. Desenvolvido nos finais do século XIX, pela companhia dos caminhos-de-ferro do Norte, em França, é composto por um patim, Figura 2.3, com um aspeto que deu origem ao seu nome, instalado entre os carris, e de uma escova metálica, Figura 2.4, instalada no chassis do comboio. Quando o sinal apresenta uma indicação proibitiva de passagem do comboio, o patim instalado na via é energizado com um sinal de elétrico de +20V que é transmitido para o comboio, no momento da sua passagem, pelo contacto elétrico entre a escova e o patim.



Figura 2.3 – Sistema Crocodilo (extraído de [1])

Esse sinal irá atuar um aviso sonoro, dentro da cabine, informando o condutor do comboio. Caso este não reaja num determinado intervalo de tempo o sistema de travagem interno do comboio será atuado automaticamente. Quando o sinal apresenta uma indicação permissiva, o patim é alimentado por um sinal de -20V, que dará origem a um outro sinal sonoro, indicando que o comboio pode continuar a sua marcha. Este sistema teve uma longevidade muito elevada. Segundo [3], à data da edição, estes equipamentos ainda funcionavam em algumas linhas de França e da Bélgica. É de salientar que, entre os

finais do século XIX e meados do século XX, foram patenteados, muitos sistemas de proteção que eram testados e implementados pelas diversas companhias ferroviárias existentes, principalmente na Europa e América do Norte. Um exemplo é um sistema mecânico acionado eletricamente, Figura 2.5, constituído por um braço mecânico que, na situação de restrição de circulação, este se apresentava levantado, para que ocorresse um contacto mecânico com uma peça do comboio, que acionasse o sistema de travagem.



Figura 2.4 - Escova metálica do sistema Crocodilo (extraído de [4])

O princípio de funcionamento destes sistemas mecânicos teve pouca continuidade, ficando praticamente confinados a algumas instalações ferroviárias urbanas (e.g. Metropolitano de Nova York).

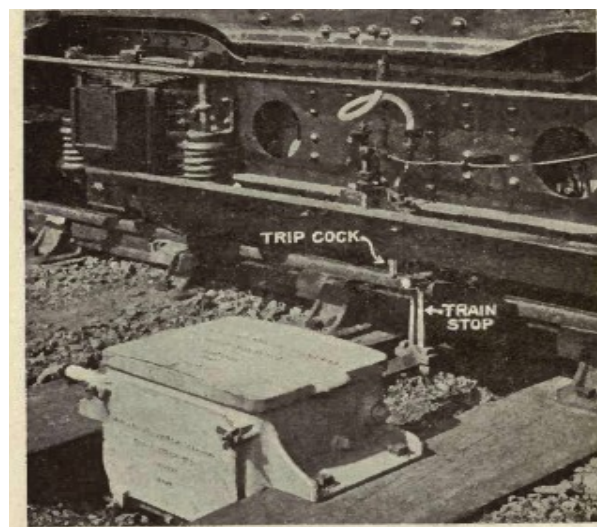


Figura 2.5 - *Train Stop* mecânico (extraído de [4])

No Reino Unido, em 1952, surgiu o AWS – Automatic Warning System. Este sistema desempenhava as mesmas funções do *Le crocodile*, todavia com um princípio de transmissão da informação para a cabine diferente. No sistema AWS a informação é transmitida por indução magnética. O equipamento instalado na via, Figura 2.6, é constituído por um íman permanente e por um eletroímã, ambos com uma orientação magnética dos polos oposta. Com a passagem do comboio, este passa pela zona de influência do íman permanente, que dá a indicação de aviso. Caso o sinal lateral apresente uma indicação permissiva à passagem do comboio, o eletroímã é ativado, reiniciando o equipamento embarcado, quanto à indicação que tinha. Na situação mais restritiva, o eletroímã não é ativo, permanecendo a informação dada pelo íman permanente, que causará o alarme na cabine e, passados alguns segundos, a travagem de emergência do comboio, caso o condutor do comboio não reaja atempadamente.

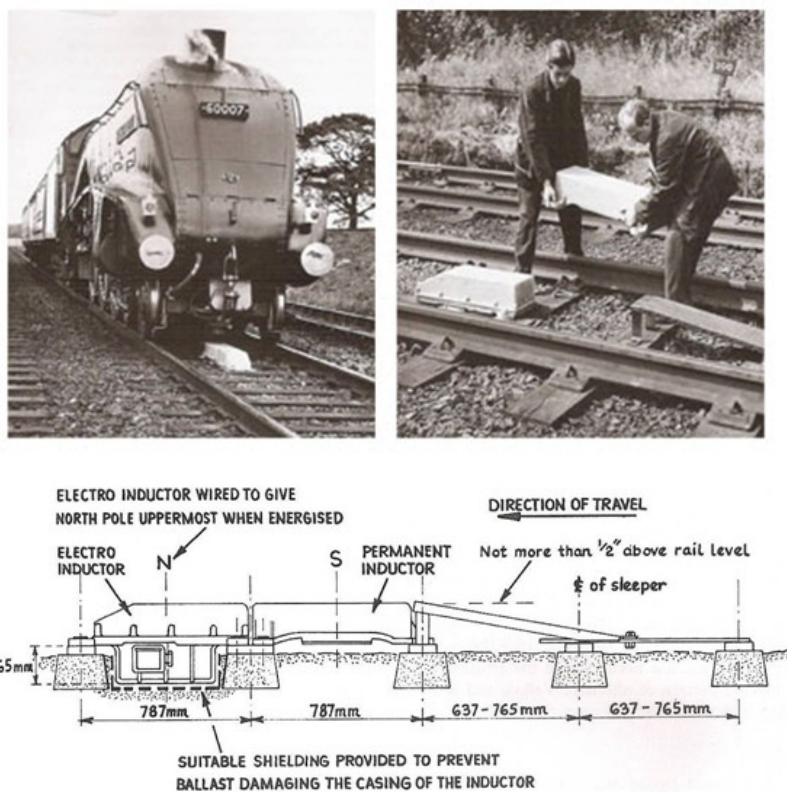


Figura 2.6 - Sistema AWS – Princípio de funcionamento (extraído de [5])

Durante a década 70, os sistemas automáticos de proteção começaram a incluir uma nova funcionalidade, o da supervisão da velocidade. Ao longo do percurso do comboio, o condutor recebia na cabine, não só a indicação do próximo sinal, como também de qual a velocidade máxima permitida a que podia circular. Nos equipamentos, mais antigos a informação da velocidade era transmitida pontualmente, ou seja, nas fronteiras de troços de via com velocidades de circulação distintas. Posteriormente, surgiram equipamentos que possibilitavam a transmissão contínua dessa mesma informação.

Em Espanha, em 1972, surgiu o sistema ASFA – *Anúncio de Sinais e Frenagem Automática*, um sistema de transmissão pontual, desenvolvido pela Dimetronic Signals, com capacidade de controlo de velocidade. Trata-se de um sistema constituído por duas balizas (denominação do equipamento instalado na via) e por uma antena instalada a bordo. Na Figura 2.7 apresenta-se um exemplo de uma baliza constituída por um circuito elétrico ressonante (Filtro indutivo e capacitivo- LC), ajustável para várias frequências de ressonância.

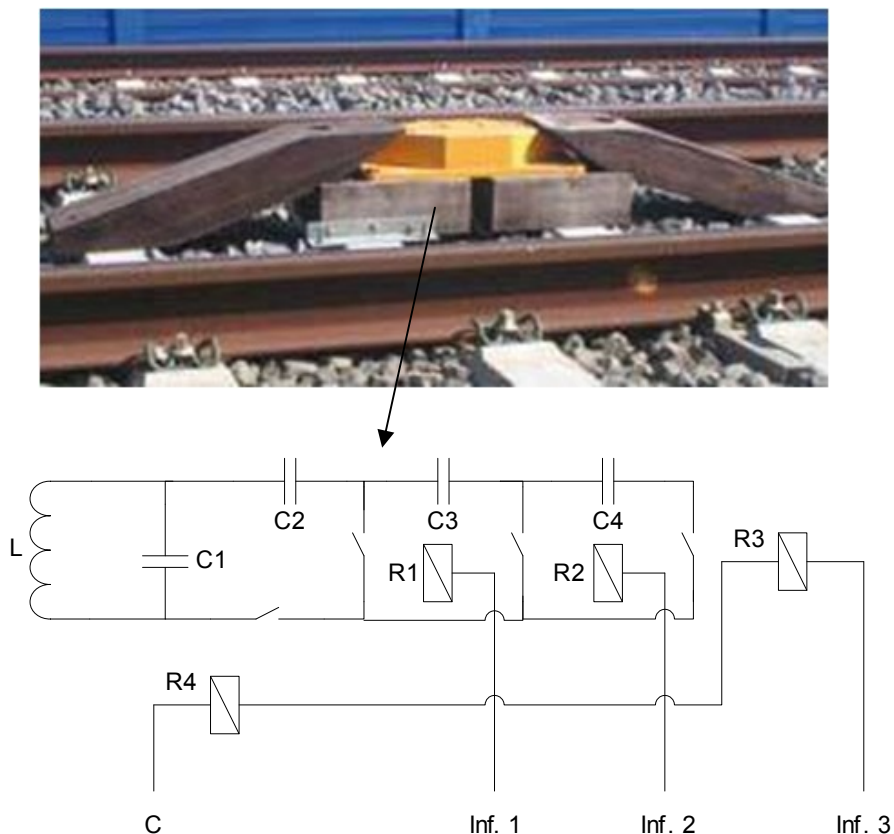


Figura 2.7 – Baliza do Sistema ASFA – Princípio de funcionamento (extraído de [6])

A cada frequência de ressonância corresponde a uma indicação que, pelo processo de indução magnética, é transmitida através do captor para o equipamento de processamento e controlo do comboio. Uma baliza prévia é instalada a aproximadamente 300 m do sinal, na qual é transmitida a informação do sinal que precede. Desta forma, o condutor do comboio será avisado através de um sinal acústico e outro luminoso, na cabine, e terá tempo de reação suficiente para respeitar a indicação recebida, evitando travagens de emergência indesejáveis. Só no caso de incumprimento, após a passagem do sinal e da sua baliza, é que o sistema de controlo do comboio atuará na velocidade do mesmo. Cada código de sinal luminoso corresponde uma determinada velocidade. No caso mais simples, onde a sinalização apenas apresenta 3 códigos luminosos (Verde, Amarelo e Vermelho), a informação enviada é a evidenciada na Tabela 2.1:

Tabela 2.1 - Velocidades admissíveis num sistema ASFA (extraído de [6])

Informação dada pela baliza anterior	Informação dada pela baliza do sinal	Aspeto do sinal	Indicação na cabine	Velocidade máxima admissível [km/h]
Via Livre	Via Livre	Verde	Indicação acústica de 300 ms	160
Redução de Velocidade	Redução de Velocidade	Amarelo	Sinal acústico contínuo + sinal visual amarelo	80
Verificação de velocidade	Travagem automática	Vermelho	Sinal acústico contínuo + sinal visual vermelho	0

O sistema ASFA tem demonstrado uma longevidade considerável, facto que levou em 2005 ao *Administrador de Infraestruturas Ferroviárias - ADIF* e a *Red Nacional de Ferrocarriles Español - RENFE* a impulsionarem um processo de evolução e melhoria do sistema, que fosse compatível com os sistemas mais modernos.

Em França, surgiram dois sistemas, também durante os anos 70, o *KVB – Controle de Vitesse à Balise* e o *TVM – Transmission Voie Machine*. O KVB, Figura 2., é um sistema

pontual constituído por uma baliza e por captores instalados a bordo. Tal como no sistema ASFA, a baliza é constituída por um circuito elétrico ressonante (Filtro LC), ajustável para várias frequências de ressonância, cada uma correspondendo a um código de velocidade.



Figura 2.8 - Sistema KVB (extraído de [7])

O TVM, Figura 2., desenvolvido pela *CSEE Transport*, surgiu, com o intuito de proteger as linhas de alta velocidade em França. Ao contrário dos sistemas anteriores, o TVM transmite a informação via /bordo de forma contínua, através de Circuitos de Via, Figura 2.. O Circuito de Via – CDV, consiste num troço de via-férrea percorrido por um sinal elétrico, que permite a deteção de um comboio.

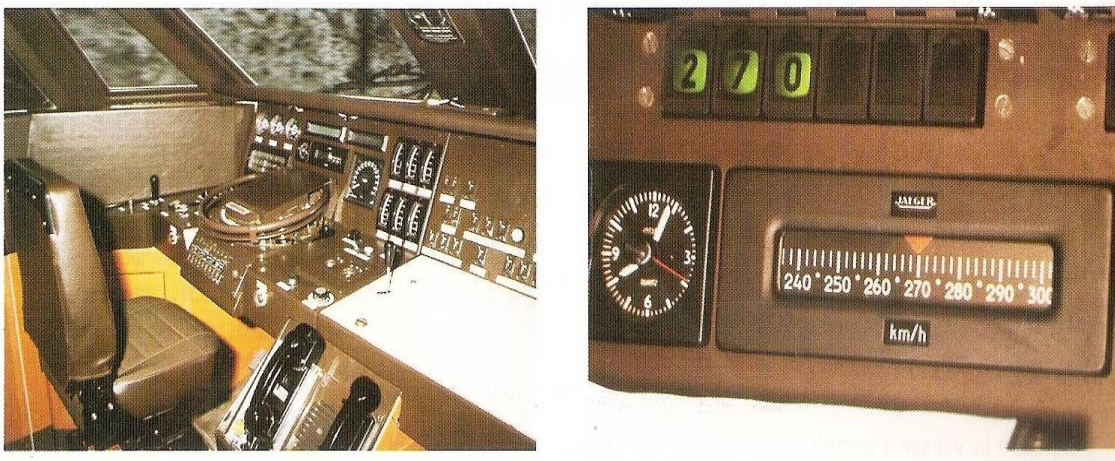


Figura 2.9 - Cabine de um comboio com o sistema TVM (extraído de [7])

Em CDV, são introduzidos sinais elétricos com frequências pré-definidas de 1700, 2000, 2300 e 2600 Hz, modulados por um sinal de +/- 10Hz. O captor do comboio deteta, por indução magnética, o sinal percorrido nos carris. Este sinal é devidamente processado por equipamento eletrónico a bordo que dará indicações visuais/sonoras na cabine sobre a velocidade máxima a que o veículo poderá circular. O TVM foi dimensionado para funcionar em linhas com velocidades máximas de 315 km/h.

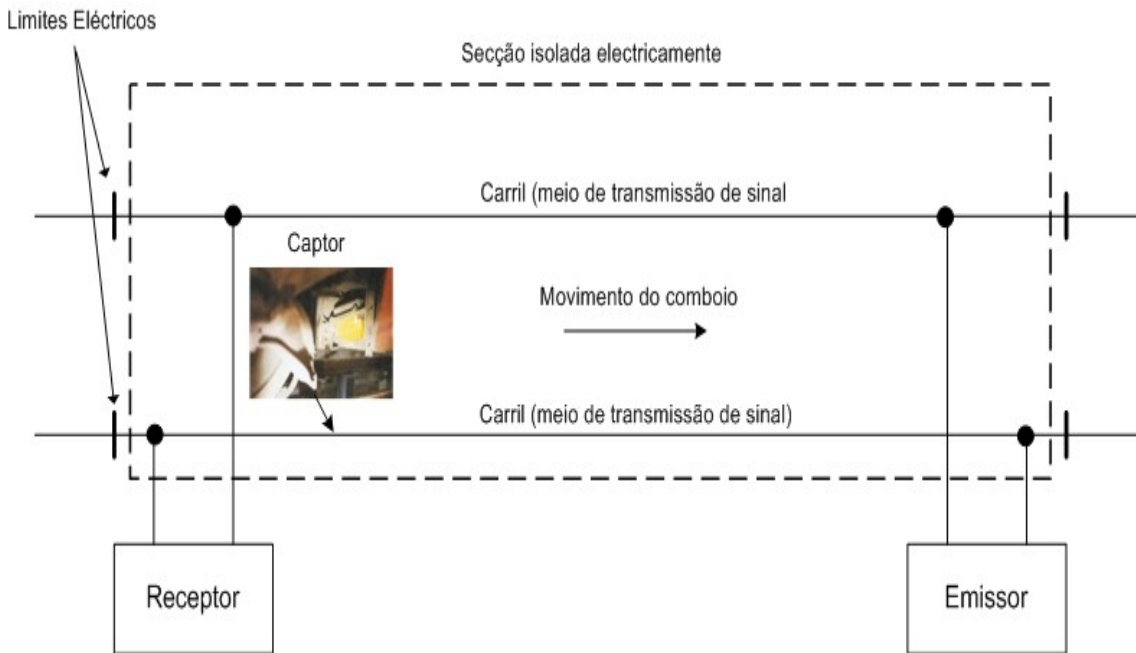


Figura 2.10 - Princípio de funcionamento de um cdv

Com a possibilidade de se poder transmitir continuamente informação entre equipamento de sinalização (instalado na via) com o equipamento de bordo, os níveis de proteção e automatização tiveram uma evolução substancial.

2.2 Sistemas de travagem automáticos da atualidade

Existem atualmente dezenas de sistemas de proteção de veículos ferroviários, instalados pelo mundo, cada um com a sua especificidade. De acordo com [3], podem-se classificar esses mesmos sistemas quanto ao tipo de transmissão, Tabela 2.2, quanto ao princípio físico de transmissão de informação via/veículo, Tabela 2.3, ou quanto às suas funcionalidades Tabela 2.4.

Tabela 2.2 - Tipos de transmissão (extraído de [3])

Intermitente		Contínua
Pontual	Linear	
Transmissão pontual	Transmissão linear intermitente	Transmissão contínua

Tabela 2.3 - Princípios físicos de transmissão (extraído de [3])

Transmissão intermitente				Transmissão contínua		
Mecânico	Galvânico	Ótico	Indutivo	Circuito de Via	Laço de indução	Rádio

Tabela 2.4 - Funcionalidades dos sistemas de proteção (extraído de [3])

Sinalização de cabine	Compreende sinais de aviso acústicos e repetição da indicação dos sinais, no interior da cabine.
Supervisão	Engloba as funções de travagem Automática de Emergência (<i>Train Stop</i>), mas também a verificação do nível de atenção do maquinista. Em intervalos regulares de tempo o operador é obrigado a acionar um dispositivo, geralmente denominado por “ <i>homem morto</i> ”, com o intuito de comprovar ao sistema de supervisão o seu nível de prontidão. Esta função permite evitar os riscos inerentes a possíveis adormecimentos, ou de indisposição por parte do condutor do veículo.
Intervenção	Todo um conjunto de funções responsáveis por verificar o bom estado de funcionamento dos equipamentos constituintes do veículo ferroviário. Caso seja detetada uma falha será dada um indicação de alarme ao condutor ou, se a gravidade da falha assim o exigir, a travagem automática de emergência.

Além da proteção automática de comboios, vulgarmente conhecida por *ATP – Automática Train Protection*, os novos sistemas passaram a incluir funções de controlo e automatização *ATC – Automática Train Control*, esta nova categoria de equipamentos teve uma grande evolução, especialmente no sector ferroviário urbano, em redes de metro. Atualmente podem distinguir -se 3 níveis de automatização, dentro dos Sistemas ATC:

ATO *Automatic Train Operation* – sistema de equipamentos que permitem o movimento automatizado do comboio, sendo que o condutor do comboio apenas executa ordem de início de marcha e abertura e fecho de portas.

Driverless Sistema em cuja presença de um operador no interior do veículo é meramente de supervisão, sendo que todo o sistema é totalmente automatizado.

Unattended Nível máximo de automatização. Neste caso não existe nenhum operador no interior do veículo, sendo que função de supervisão é executada remotamente.

2.3 Normalização de segurança ferroviária

Os sistemas de sinalização ferroviária, nos quais estão inseridos os sistemas de proteção automática de comboios foram sempre alvo de constante preocupação, por parte dos seus fabricantes e das empresas de transporte ferroviário, no que toca à garantia da sua segurança, quer na sua fase de projeto e desenvolvimento, quer na sua fase de exploração. Com a crescente diversidade deste tipo de equipamentos, houve a necessidade de uniformização dos princípios de segurança a eles subjacentes. As normas CENELEC de sinalização ferroviária EN50126 (1999), EN50128 (2001) e EN50129 (2003), vieram dar um contributo às entidades ferroviárias e fornecedores, disponibilizando um processo que permite a implementação de um método de gestão da fiabilidade, disponibilidade, manutibilidade e segurança, designado pelo acrónimo RAMS (Reability, Availability Maintainability and Safety). O processo inicia-se com definição dos elementos RAMS do sistema ferroviário a ser controlado e a determinação dos fatores que podem influencia-lo na fase de desenvolvimento (e.g. erros de especificação), de exploração (e.g. fator humano, avarias, etc. ...) e de manutenção (e.g. procedimentos de manutenção, logística, etc.). A norma EN50126 define ainda um método de análise de risco, a sua avaliação e sua aceitação por parte das entidades responsáveis, Tabela 2.5. Finalmente, sugere a definição do ciclo de vida do sistema, garantido que desde a fase inicial de conceção, passando pela fase de instalação e exploração, terminando na fase de abate, o sistema é controlado, nos pressupostos RAMS.

A norma EN50128 define os requisitos técnicos no desenvolvimento de software para fins de proteção e controlo ferroviário. Atendendo a que todos os sistemas atuais são baseados em sistemas de microprocessadores e autómatos programáveis, a norma

recomenda a utilização de determinadas linguagens de programação, em detrimento de outras, para a garantia do nível de integridade desejado.

Tabela 2.5 - Níveis de Risco (extraído de [9])

Frequência de acontecimentos	Níveis de Risco			
	Frequente	Indesejável	Intolerável	Intolerável
Provável	Tolerável	Indesejável	Intolerável	Intolerável
Ocasional	Tolerável	Indesejável	Indesejável	Intolerável
Remoto	Desprezável	Tolerável	Indesejável	Indesejável
Improvável	Desprezável	Desprezável	Tolerável	Tolerável
Impossível	Desprezável	Desprezável	Desprezável	Desprezável
	Insignificante	Marginal	Crítico	Catastrófico
Níveis de gravidade das consequências de uma situação potencialmente perigosas				

A norma EN50129 define os níveis de segurança intrínseca, SIL - *Safety Integrity Level*, Tabela 2.5, para equipamentos eletrónicos de sinalização ferroviária e aborda necessidade da existência de cadernos de segurança que permitam evidenciar que os referidos equipamentos eletrónicos cumprem o nível de segurança desejado.

Tabela 2.6 - Níveis de segurança SIL (extraído de [9])

Taxa de falhas aceitável (THR por hora e por função)	Nível Integridade de Segurança (SIL)
$10^{-9} \leq THR < 10^{-8}$	4
$10^{-8} \leq THR < 10^{-7}$	3
$10^{-7} \leq THR < 10^{-6}$	2
$10^{-6} \leq THR < 10^{-5}$	1

2.4 Interoperabilidade Europeia (ERTMS)

Com o constante desenvolvimento de sistemas de proteção ferroviários o número de equipamentos proprietários, instalados na Europa, ronda as dezenas, cada um com as suas especificidades funcionais e de fabrico. Esta diversidade levantou problemas de compatibilidade entre os diferentes tipos de material circulante a transitar em diferentes redes ferroviárias. Com o intuito de criar as condições de interoperabilidade entre os diferentes sistemas ferroviários dos diversos países europeus, a Comissão Europeia, promoveu, no início dos anos 90 a elaboração de um conjunto de estudos e especificações que permitisse a adequada compatibilidade entre os novos sistemas a serem desenvolvidos pelos diferentes fabricantes. Estas especificações deram origem, também em meados dos anos 90, ao *ERTMS – European Rail Traffic Management System*, sendo subdividido em 2 subsistemas:

ETCS European Train Control System – Conjunto de especificações funcionais dos equipamentos de ATP e interface com os encravamentos.

GSM-R *Global System for Mobile Communications – Railway* - Sistema de comunicações de voz e dados, entre o comboio e os sistemas de controlo.

O sistema ERTMS contempla 5 níveis de aplicação:

Nível 0 O veículo equipado com um sistema ETCS circula numa zona não equipada. As funções de supervisão são limitadas à garantia das velocidades mínimas e máximas do comboio definidas para o nível 0.

Nível 1 Comboio equipado com o sistema ETCS a circular numa ferrovia equipada com balizas. Este nível de implementação, Figura 2.11, corresponde a um sistema de proteção pontual de velocidades máximas, complementado com sinalização lateral.

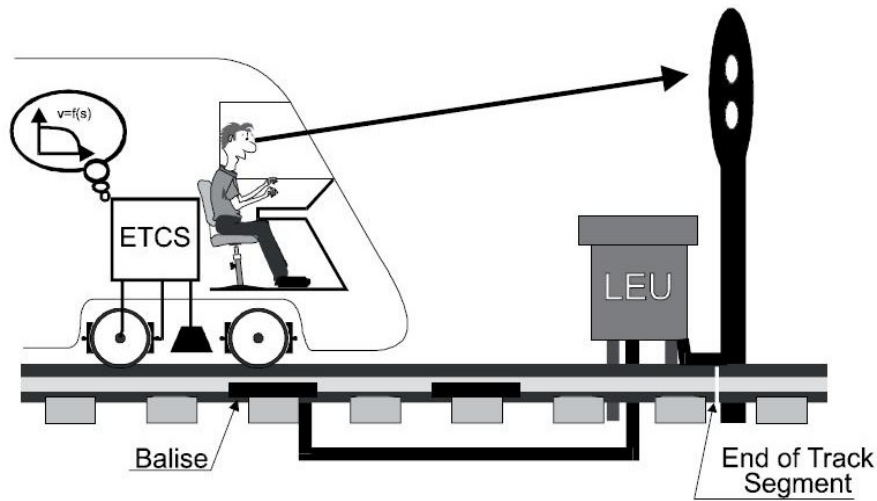


Figura 2.11 - ERTMS nível 1 (extraído de [10])

Nível 2 A informação é transmitido via rádio (especificação GSM-R) e balizas. Trata-se de um sistema de transmissão contínua tipo “distância objetivo”, ou seja, a velocidade máxima permitida do comboio varia consoante a distância entre o mesmo e o fim do cantão. A deteção de comboios é realizada mediante circuitos de via e não existe sinalização lateral, Figura 2.12.

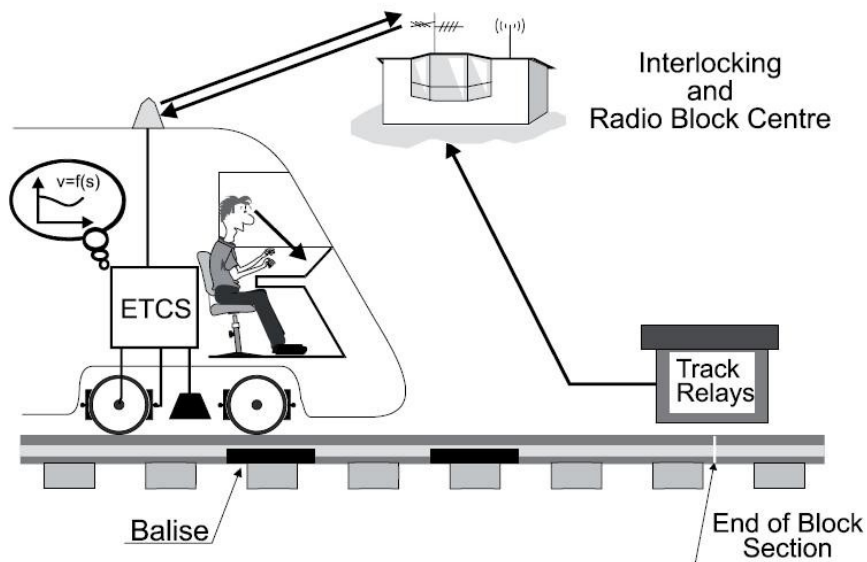


Figura 2.12 - ERTMS nível 2 (extraído de [10])

Nível 3 A informação é transmitido via rádio (especificação GSM-R). Consiste num sistema do tipo “cantão móvel”. Neste sistema não existem circuitos de via, nem sinalização lateral, Figura 2.13.

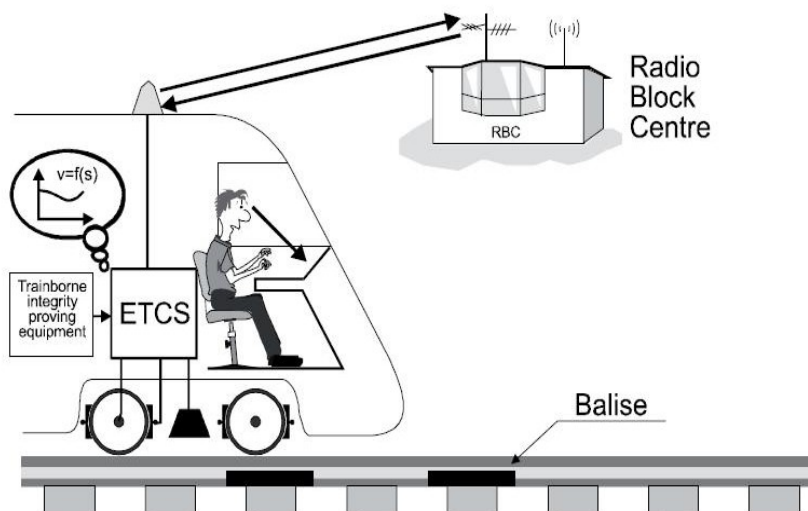


Figura 2.13 - ERTMS nível 3 (extraído de [11])

Nível STM *Specific Transmission Module* - O veículo equipado com o sistema ETCS circula numa zona equipada com um sistema de proteção nacional. Este nível foi criado para o período de migração dos sistemas instalados nos diversos países para o sistema ETCS.

2.5 Projetos de especificações em redes ferroviárias urbanas

Com o objetivo de analisar a possibilidade de adaptação das especificações de proteção automática de comboios do sistema ERTMS, às redes ferroviárias urbanas, foi criado no ano 2000, o grupo de trabalho UGTMS – *Urban Guided Transport Management System*. O estudo, cujo relatório final foi publicado em 2004, deu origem a um conjunto de recomendações para a definição dos níveis de operação, automação e seus requisitos funcionais, que permitissem a interoperabilidade e a intermutabilidade de equipamentos de vários fabricantes. De acordo com o [12], foram definidos 6 níveis de operação e automatização, Tabela 2.7.

Tabela 2.7 - Níveis de automação UGTMS (extraído de [11])

Níveis de Automação	Descrição
L01 - Operação marcha à vista	Comboio é totalmente controlado pelo condutor de cabina; Agulhas controladas pelo condutor, ou pelo sistema;
L01A - Operação não automatizada	Supervisão pontual do sistema; Condutor em cabina; Existência de sinalização lateral;
L1B - Operação controlada com sistema de ATP contínuo	Condutor em cabina; Existência de sinalização lateral; Supervisão contínua da velocidade;
L2 - Operação semi-Automática	O condutor só supervisiona a via e a abertura/fecho de portas. A condução é feita pelo sistema;
L3 - Operação sem condutor (Driverless)	Sem condutor mas com agente a bordo ou nas estações; A condução é automática sendo supervisionada remotamente;
L4 - Unattended – operação sem agente a bordo	Condução totalmente automatizada sendo a supervisão realizada remotamente;

O projeto UGTMS teve como sucessor o MODURBAN (2004-2009) – *Modular Urban Guided Rail System*, também financiado pela União Europeia. O seu objetivo era o de projetar e desenvolver um sistema aberto (sem tecnologias proprietárias), tendo como resultado final a sua implementação num protótipo instalado no Metro de Madrid. O MODURBAN foi subdividido em 6 subsistemas, cuja descrição genérica é evidenciada na Tabela 2.8:

Tabela 2.8 – Subsistemas MODURBAN (extraído de [12])

Subsistema	Sistemas desenvolvidos
MODONBOARD	Desenvolvimento e módulos de interface standard, a bordo do comboio, relativos ao sistema de proteção automática - ATP
MODWAYSIDE	Desenvolvimento de Interfaces entre o centro de comando e controlo (OCC) e o sistema ATP/encravamento
MODACCESS	Desenvolvimento de interfaces de acesso de passageiros que evitem a sua queda da plataforma de embarque e o veículo (portas automáticas de cais).
MODCOMM	Quantificação das necessidades de comunicação em redes urbanas de metro
MODENERGY	Os sistemas serão desenvolvidos com a preocupação da eficiência energética

2.6 Conclusões

Os sistemas de proteção automática de comboios têm tido uma evolução significativa desde a revolução industrial até à atualidade, nomeadamente no tipo e número de funcionalidades que disponibilizam, como também na variedade dos princípios físicos de funcionamento. Dada a multiplicidade de sistemas existentes, cada um com as suas especificidades e tendo em conta a crescente necessidade de interoperabilidade entre os vários operadores ferroviários, aliada à consolidação de conceitos como Fiabilidade, Disponibilidade, Manutibilidade e Segurança dos sistemas de proteção, começaram a surgir em meados dos anos noventa, um conjunto de especificações e normativos que contribuíssem para a evolução dos sistemas no cumprimento das necessidades atuais.

CAPÍTULO 3

DESCRIÇÃO DO SISTEMA DTAV

Resumo

Neste capítulo é realizada uma descrição pormenorizada do sistema DTAV, nomeadamente o seu princípio de funcionamento e os equipamentos de que é constituído.

3 DESCRIÇÃO DO SISTEMA DTAV

O sistema *DTAV* é um equipamento desenvolvido pela *CSEE Transport* (actual *Ansaldo STS*) tendo sido instalados no *Metropolitano de Lisboa E.P.E*, pela primeira vez, em 1972. Atualmente encontram-se instalados em toda a rede ferroviária (575 sinais) e material circulante (200 unidades motoras). Consiste num sistema de proteção pontual com a função de *Train-stop*. O princípio físico de transmissão via – bordo, é do tipo indutivo, apresentando algumas semelhanças ao já referenciado sistema *AWS*. O sistema é constituído por um conjunto de equipamentos instalados na via-férrea e a bordo do comboio, tal como evidenciado na Figura 3.1.

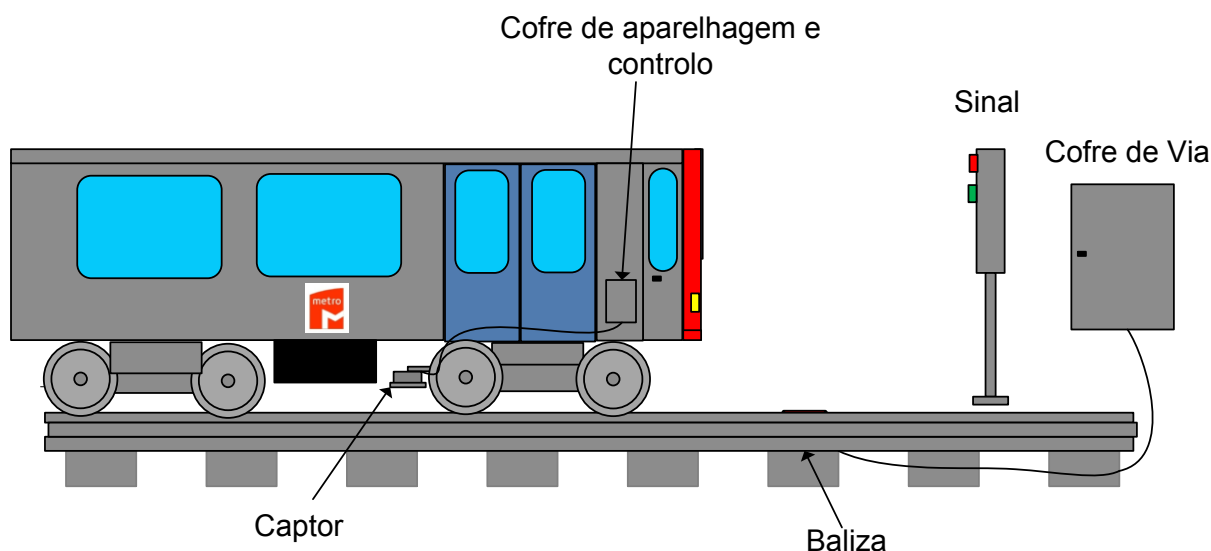


Figura 3.1 – Constituição do sistema DTAV

3.1 Equipamento de Via

A baliza comutável é o equipamento responsável pela emissão da informação permissiva/proibitiva. Composta por uma bobine e por um conjunto de ímanes permanentes, inseridos no invólucro de madeira. É geralmente instalada entre os carris, a uma distância de 3.65m do sinal ferroviário, Figura 3.2. Este equipamento emite, através dos ímanes permanentes, um campo magnético estático e através de uma bobine, um campo eletromagnético, a informação permissiva/proibitiva a ser detetada pelo captor do comboio. O campo eletromagnético é gerado na bobine, por intermédio de um sinal

elétrico com uma frequência de 4510Hz, recebido do cofre de DTAV, através de um cabo elétrico. Existe ainda um outro tipo de baliza, instalado no ML, denominada “baliza fixa”, Figura 3.3, que é apenas constituída por ímanes permanentes.



Figura 3.2 - Baliza de DTAV

Esta baliza apenas emite sinal proibitivo, e é instalada nas zonas de fim de via-férrea, ou em zonas de manobra. Apesar deste tipo de baliza ter algumas semelhanças com a baliza comutável, não será o alvo principal do estudo do presente trabalho.



Figura 3.3 - Baliza fixa

O cofre de via, Figura 3.4, é responsável pela alimentação da baliza com um sinal de 4510Hz. Instalado nas imediações da baliza, fora da zona de *gabarit*, consiste num

circuito eletrónico que recebe as condições de segurança (sinal permissivo/proibitivo) provenientes do encravamento, geralmente por intermédio de um relé de segurança, designado por relé de DTAV. Se a informação recebida for permissiva, o circuito gera o sinal de áudiofrequência, enviando-o para a baliza, através de um cabo elétrico. Caso a condição seja proibitiva o circuito não gera qualquer sinal.



Figura 3.4 - Cofre de via do DTAV

3.2 Equipamento de Bordo

Para que o comboio receba a informação da baliza comutável do DTAV é instalado a bordo um captor, Figura 3.5.



Figura 3.5 - Captor do comboio

Este equipamento tem a capacidade de detetar, por indução magnética, os campos emitidos pela bobina da baliza. O captor é constituído essencialmente por duas bobinas captoras do sinal permissivo e duas bobines acopladas a um circuito magnético saturável, que irá interagir com o campo magnético estático da baliza, Figura 3.6.

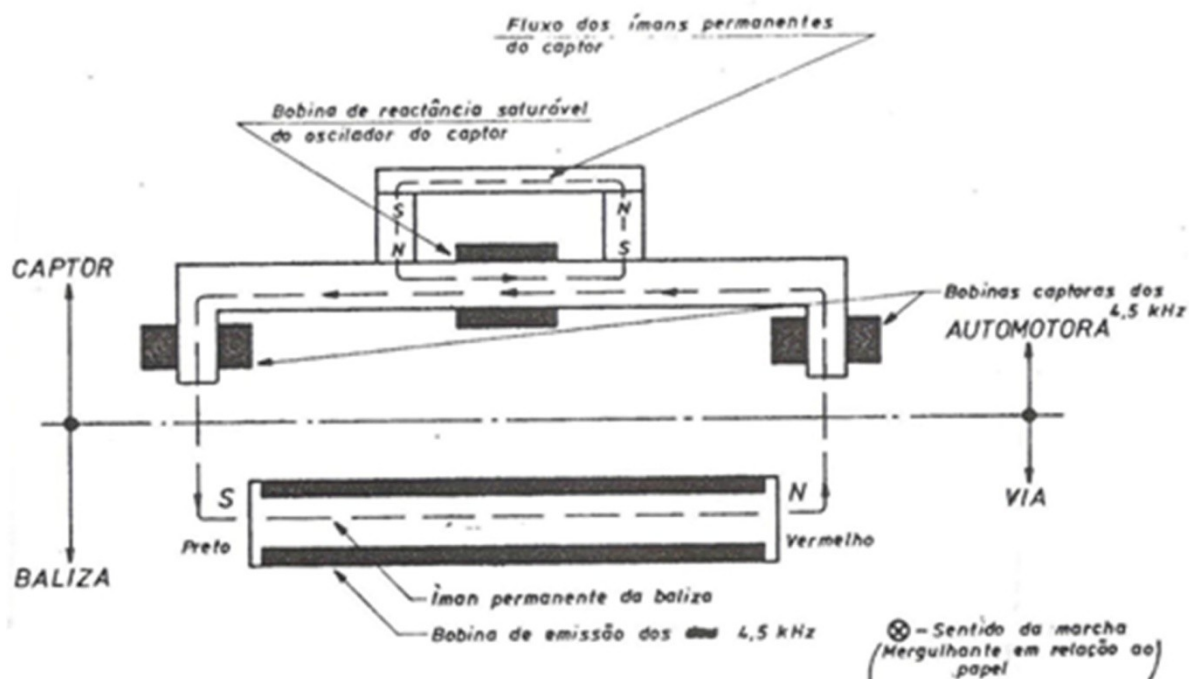


Figura 3.6 - Princípio de funcionamento do captor (extraído de [13])

As bobines do circuito magnético saturável são também parte integrante de um circuito elétrico oscilador. Quando o captor se encontra fora da zona de influência da baliza o circuito oscilador gera um sinal elétrico com uma frequência compreendida entre 6 e 8kHz, que é enviado para o equipamento de processamento do comboio, localizado num cofre de aparelhagem. No momento da passagem do captor sobre a zona de influência da baliza, as linhas de fluxo magnético, provenientes dos ímanes permanentes da baliza, vão contrariar as linhas de fluxo do circuito magnético saturável do captor, Figura 3.6.

Este efeito faz com que as bobines inseridas no circuito magnético tenham um aumento na sua reactância, levando a que o sinal do circuito oscilador caia abruptamente. Este sinal deixa de chegar ao circuito de processamento do comboio, que interpretará como estando na presença de uma baliza de DTAV. A Tabela 3.1 indica em que situações o sistema DTAV considera o estado permissivo, ou proibitivo.

Tabela 3.1 - Condições de funcionamento do DTAV

Condição		Sinais detetados pelo captor	Sinais recebidos pelo cofre de aparelhagem	Resposta do sistema
Captor fora da zona de influência da baliza	Circulação normal	-	Sinal 8 kHz (oscilador do captor)	Autorização de circulação
Captor dentro da zona de influência da baliza	Sinal proibitivo	Campo magnético estático (imanes permanentes da baliza)	-	Travagem de emergência
	Sinal permissivo	Campo magnético estático campo magnético oscilante 4.5 kHz	Sinal 4.5 kHz	Autorização de circulação

Para uma visão mais detalhada do captor é apresentada na Figura 3.6 uma visão do interior do captor do DTAV, onde se podem identificar as bobines captoras, o núcleo magnético saturável com as suas bobines e o circuito eletrônico oscilador.

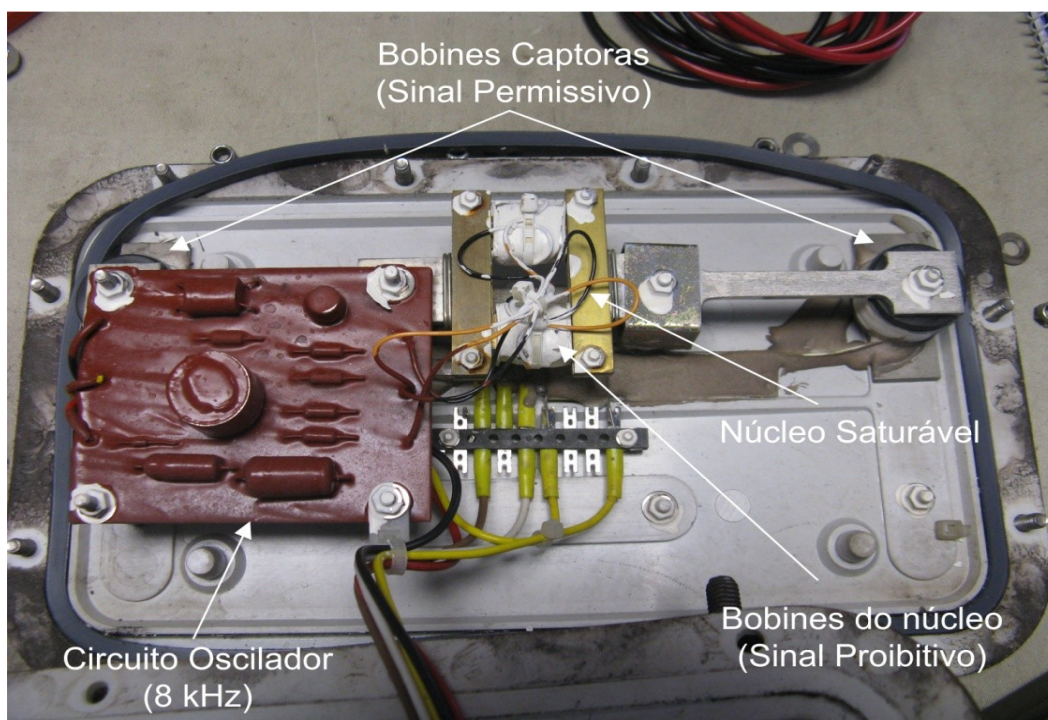


Figura 3.7 - Interior do Captor

O processamento dos sinais elétricos, provenientes do captor, é realizado no cofre de aparelhagem, instalado na cabine do condutor, constituído por uma *rack* de cartas eletrónicas, Figura 3.8:



Figura 3.8 - Cofre de Aparelhagem

Além dos sinais provenientes do captor, o cofre de aparelhagem recebe igualmente a informação de movimento dada pelo sistema taquimétrico do comboio, a informação da posição do manípulo de direção (comandos do condutor), e as ordens dadas pelo condutor no painel de comando e controlo. O cofre de aparelhagem é responsável pela ordem de marcha normal do comboio/travagem automática, através da operação /desoperação de um relé K1. Adicionalmente, envia a informação de travagem automática (luz vermelha acesa) e a informação “DTAV em serviço” (Lâmpada Verde acesa), para o painel de comando e controlo. A alimentação do cofre de aparelhagem, Figura 3.8, é realizada por intermédio das placas eletrónicas ALCO e STAB, Figura 3.9.

A carta ALCO consiste num conversor elétrico DC-DC, que é alimentado pelo sistema de baterias do comboio, cuja tensão pode variar entre 45V e 120V. À saída, fornece uma tensão elétrica de $\pm 15\text{Vdc}$, sendo que a regulação da tensão de saída é feita com base na tensão de entrada. A carta ALCO alimenta, por sua vez, a carta STAB, responsável por fornecer uma tensão de $\pm 12\text{Vdc}$, regulada em função da carga, às restantes cartas eletrónicas da *rack*.

Os sinais provenientes do captor do DTAV, são amplificados pelas cartas INNE A e B. Estas duas cartas, idênticas entre si, detetam a presença do sinal proibitivo do oscilador do captor (8kHz) e do sinal permissivo (4510Hz), emitido pela baliza. Além disso, cada carta verifica o bom funcionamento da sua complementar, atestando a presença do sinal proibitivo.

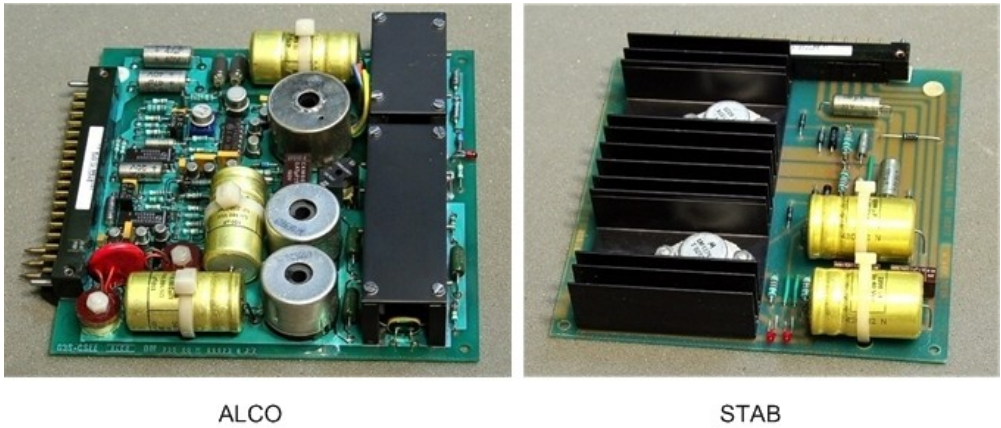


Figura 3.9 - Placas ALCO e STAB

A carta ULTR, Figura 3.10, tem como função a substituição do sinal proibitivo, nos casos em que o condutor do comboio necessite ultrapassar uma baliza em estado proibitivo. Nestes casos pontuais e devidamente regulamentados, o condutor pressiona o botão de ultrapassagem, situado na cabine, fazendo com que a carta ULTR substitua o sinal do captor, impedindo que o comboio seja travado. A substituição do sinal proibitivo é temporizada tendo uma duração máxima de 5 segundos.

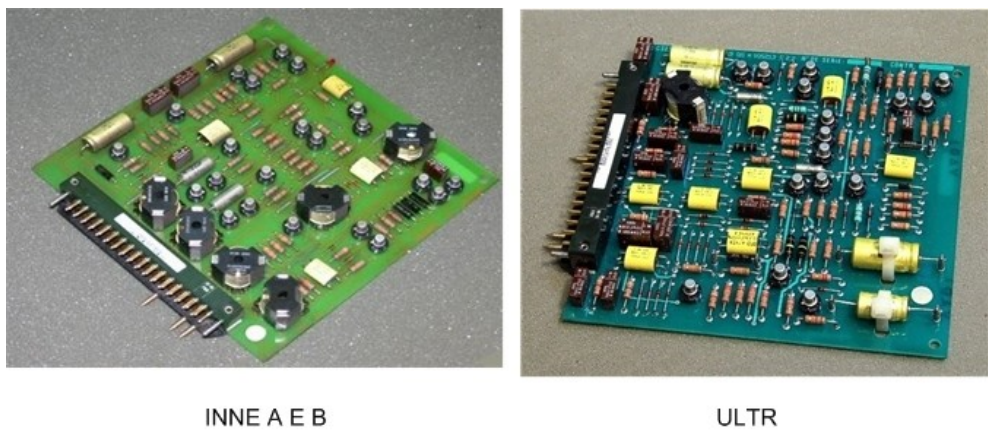


Figura 3.10 - Placas INNE A/B e ULTR

Outra carta existente no cofre de aparelhagem é a INPO 3, Figura 3.11. Esta carta tem como função o processamento da informação, provenientes das cartas INNE A e B. Consoante a presença/ausência dos sinais de 8kHz e 4510Hz, é gerado um sinal interno de controlo que, por intermédio da carta de amplificação AMIP 2, Figura 3.11, irá atuar no relé de travagem automática K1, já mencionado anteriormente.

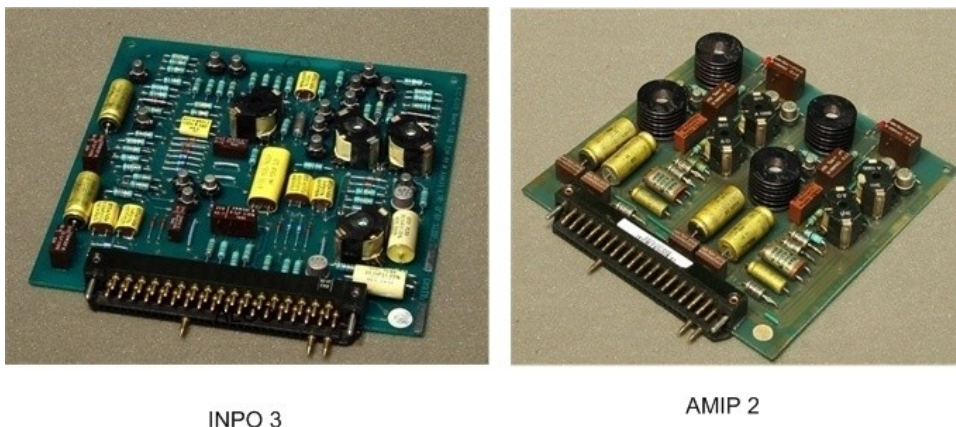


Figura 3.11 - PLACAS INPO3 E AMIP 2

A completar o conjunto de placas eletrônicas, constituintes do cofre de aparelhagem, estão a BICO e a SEC A e B, evidenciadas na Figura 3.12. A carta BICO tem como função proporcionar o interface elétrico do painel de comando e controlo, Figura 3.13, ao passo que as cartas SEC A e B disponibilizam a alimentação de 24Vdc, necessárias para o funcionamento dos osciladores dos captosres.

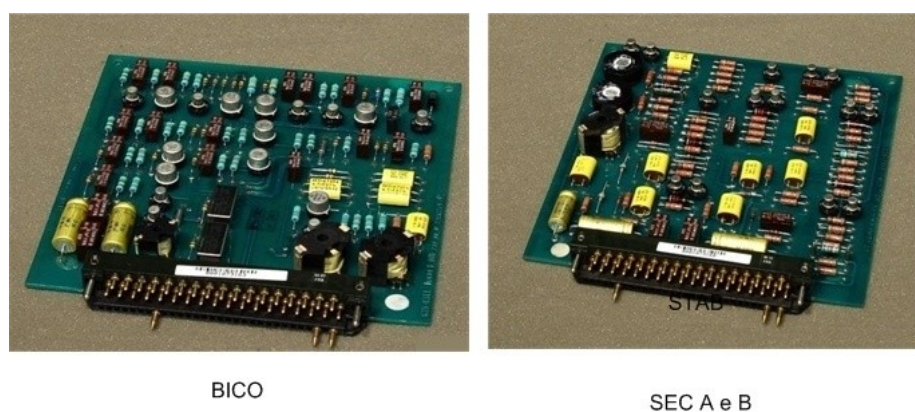


Figura 3.12 - Placa BICO e SEC A e B

Durante a descrição funcional das cartas eletrônicas constituintes do cofre de aparelhagem e controlo, foi mencionado várias vezes a existência de um painel de comando e controlo, Figura 3.13, existente na cabina do condutor.



Figura 3.13 - Painel de Comando e Controlo

No referido interface está presente uma lâmpada indicadora de cor verde, que está acesa sempre que o sistema DTAV está em funcionamento. Estão igualmente presentes dois botões seletores com o nome “Rearme” e “Ultrapassagem”.

O primeiro é utilizado sempre que ocorre uma ultrapassagem indevida de um sinal. Após a imobilização do comboio, o sistema DTAV tem de ser rearmado para que o comboio possa circular novamente.

No caso do botão “Ultrapassagem” este utilizado, nos casos em que o condutor necessita ultrapassar um sinal em estado proibitivo, nas condições previstas no regulamento de circulação de comboios do ML [14]. A cada um dos botões referidos estão associados um contador de eventos que regista o número de vezes que ocorrem travagens de emergência.

3.3 Conclusão

Neste capítulo foi apresentada uma descrição pormenorizada do sistema DTAV, nomeadamente o seu princípio físico de funcionamento (indução magnética) e os equipamentos eletrónicos de que é constituído. O DTAV é um sistema de proteção automático de comboios, com a funcionalidade *Train-stop*, utilizado no ML, desde a década de 70. Apesar de não ser um sistema certificado com as mais recentes normas de segurança (EN50126, EN50128 e EN50129), a sua disponibilidade e fiabilidade é comprovada, não só com pela sua arquitetura funcional, evidenciada no presente capítulo, como também pelo tempo de serviço no ML, sem registo de falhas de segurança.

CAPÍTULO 4

MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

Resumo

É realizada uma apresentação genérica do método dos elementos finitos, bem como a descrição da fundamentação teórica em que o *software* de simulação se sustenta, nomeadamente, as equações físicas de eletromagnetismo.

4 MÉTODO DOS ELEMENTOS FINITOS

4.1 Introdução

Desde os primórdios da civilização, que o homem tenta compreender os fenômenos físicos que o rodeia, muitas vezes impelido pela curiosidade, outras pela necessidade de resolver um problema com que é defrontado, na esperança de lhe facilitar a sua vida cotidiana. Neste contexto a matemática, tem sido uma das ferramentas que tem evoluído como consequência da já mencionadas “curiosidade humana” e “necessidade humana”, permitindo descrever, através de um conjunto de símbolos e regras um determinado fenômeno natural.

Com o advento da idade moderna, séc. XVII, as disciplinas que conhecemos nos nossos dias, como a Física, ou as Engenharias, começaram a desenvolver-se, permitindo um método sistemático para a compreensão das leis da natureza, através do enunciado das denominadas Leis Físicas, muitas vezes representadas sob a forma de equações matemáticas, nomeadamente, por equações diferenciais. Todavia, nem sempre a solução das equações matemáticas são obtidas facilmente, na forma analítica. Foi então que começaram a surgir métodos de obtenção de soluções aproximadas, dando origem à disciplina da análise numérica.

O MEF – método dos elementos finitos é um dos métodos numéricos existentes atualmente, que permite a obtenção de soluções aproximadas de muitos problemas que surgem nos nossos dias, nas diferentes áreas de conhecimento, nomeadamente na Física, Engenharias (Mecânica, Civil, Eletrotécnica, Aeronáutica, etc.), Geografia (e.g. modelos de previsão meteorológica), Geologia, entre outras. Segundo [15], o termo “elemento finito” foi definido pela primeira vez por Clough, em 1960, na resolução de problemas mecânicos de elasticidade. A definição do método propriamente dito é atribuída a Courant, na década de 40 do século XX. Na sua essência, o MEF, consiste na discretização de um sistema contínuo, tal como exemplificado na Figura 4.1 e no cálculo individualizado das equações algébricas de aproximação em cada “nó”, nomeadamente através de técnicas como o método resíduos pesados de Galerkin, o método variacional etc.

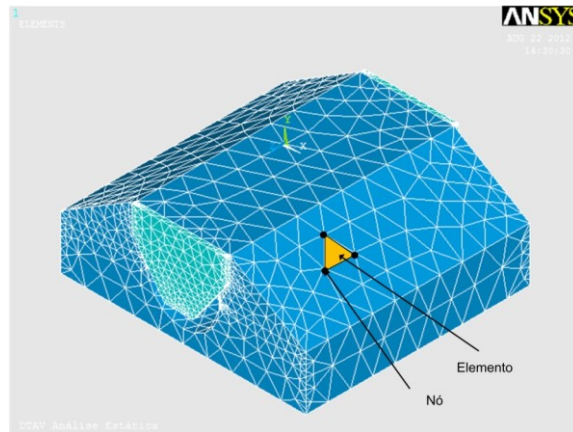


Figura 4.1 – Discretização de um sistema contínuo

Em relação aos elementos, as equações algébricas são determinadas através de funções de interpolação, tendo como referência as equações dos nós adjacentes a cada elemento. De seguida, relacionam-se todo o conjunto de soluções individuais calculadas, para determinar a solução global do sistema, tendo sempre em consideração os critérios de continuidade e de fronteira do sistema. Dado o elevado crescimento da capacidade computacional, nas últimas décadas é possível atualmente modelizar sistemas com milhões de graus de liberdade, estando as ferramentas computacionais acessíveis ao público em geral, através de softwares comerciais, como o Ansys, SolidWorks, FEM, Abakus, etc.. Este conjunto de aplicações oferecem um ambiente de desenvolvimento cada vez mais intuitivo, permitindo ao utilizador uma certa abstração de todo o método matemático subjacente. Todavia, para garantir que os resultados obtidos sejam válidos é imprescindível o conhecimento prévio, não só das condições do sistema a modelizar, como também dos pressupostos teóricos que o software disponibiliza. É comum dividir um projeto com *software* em elementos finitos em 3 fases distintas, tal como evidenciado na Figura 4.2.

Na primeira etapa, denominada a fase de pré-processamento, é construído o modelo geométrico do sistema e posteriormente a sua discretização, ou seja, a construção da malha de elementos finitos. São também definidas todas as propriedades físicas dos materiais envolvidos, as restrições (ex.: condições de fronteira) e os denominados carregamentos [16], ou seja, todas as forças exteriores aplicadas a sistema.

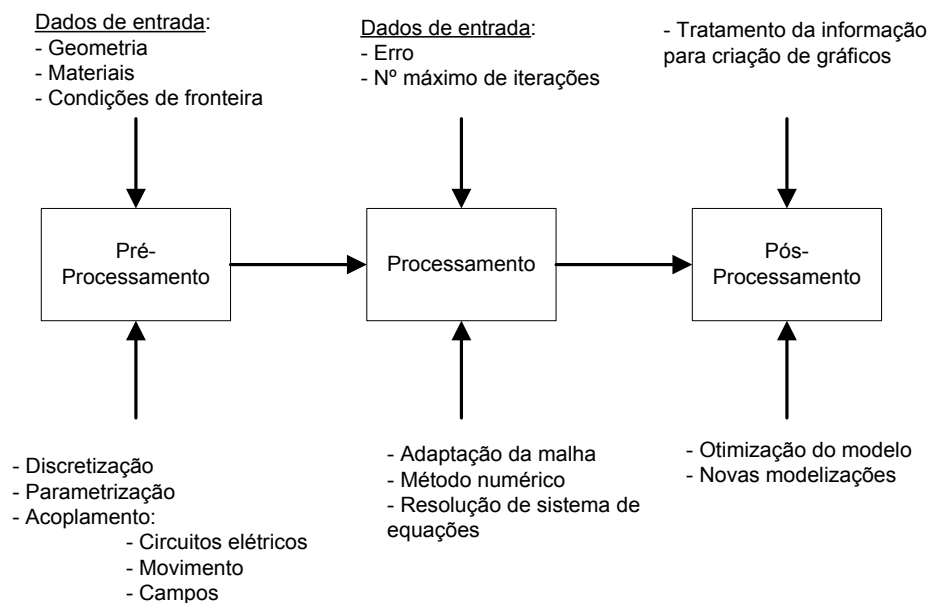


Figura 4.2 – Fases do Método dos elementos Finitos (baseado em [21])

A segunda fase corresponde ao cálculo da solução sistema, um processo do qual o utilizador geralmente se abstrai, geralmente moroso, dado o habitual número de nós, elementos e, conseqüentemente, graus de liberdade. A terceira e última fase, a de Pós-processamento, não é mais do que o tratamento dos resultados obtidos, nomeadamente através do cálculo de grandezas físicas secundárias, tendo por base a solução previamente obtida, e na construção de representações gráficas (gráficos e animações) que permitam evidenciar os resultados simulação efetuada.

4.2 Aplicação do MEF ao Modelo DTAV

Para compreender como o *software* de elementos finitos lida com problemas de magnetismo, foi necessário consultar os fundamentos teóricos em que se baseia. Como primeiro passo são evidenciadas as equações físicas do eletromagnetismo (equações de Maxwell) [17]:

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} = \bar{J}_s + \bar{J}_e + \bar{J}_{vs} + \frac{\partial \bar{D}}{\partial t} \quad (4.1)$$

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (4.2)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (4.3)$$

$$\nabla \cdot \bar{D} = \rho \quad (4.4)$$

Onde:

$\nabla \times$ Operador Gradiente

$\nabla \cdot$ Operador Divergente

\bar{H} Vetor Intensidade do Campo Magnético

\bar{J} Vetor Densidade de Corrente Total

\bar{J}_s Vetor Densidade de Corrente Aplicada

\bar{J}_e Vetor Densidade de Correntes de Fuga (Eddy)

\bar{D} Vetor do Fluxo Elétrico (corrente de deslocamento)

t Tempo

\bar{E} Vetor Intensidade do campo Elétrico

\bar{B} Vetor Densidade de Fluxo Magnético

ρ Densidade de carga elétrica

Em relação às propriedades físicas dos materiais, a análise eletromagnética tem em conta a equação (4.5) [17]:

$$\bar{B} = [\mu]\bar{H} \quad (4.5)$$

Em (4.5) μ é a matriz de permeabilidade magnética, sendo função da intensidade do campo H e da temperatura. Neste projeto o efeito temperatura não é contemplado, pelo que a matriz de permeabilidade magnética será dada por (4.6) [17]:

$$[\mu] = \mu_h \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (4.6)$$

Em (4.6) μ_h é a permeabilidade derivada da curva de magnetização.

A propriedade magnética dos imanes permanentes é dada pelo cálculo matricial de (4.7) [17]:

$$\bar{B} = [\mu]\bar{H} + \mu_0[M_0] \quad (4.7)$$

Em (4.7) M_0 é o vetor de magnetização remanescente.

Reescrevendo a equação, considerando a relutância magnética [17].

$$\bar{H} = [v] \cdot \bar{B} - \frac{1}{v_0} [v][M_0] \quad (4.8)$$

$[v] = [\mu] - 1$ Matriz de Relutância Magnética

$v_0 = \frac{1}{\mu_0}$ Relutância Magnética no vácuo

A relação entre os campos elétricos, magnéticos e a densidade de corrente, envolvidos no sistema pode ser dada por (4.9) e (4.10), [17]:

$$\bar{J} = [\sigma][\bar{E} + \bar{v} \times \bar{B}] \quad (4.9)$$

$$\bar{D} = [\varepsilon]\bar{E} \quad (4.10)$$

Onde,

$$[\sigma] = \begin{bmatrix} \sigma_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \sigma_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \sigma_{zz} \end{bmatrix} \quad \text{Matriz de Condutibilidade Elétrica}$$

σ_{xx} Condutibilidade na direção x

$$[\varepsilon] = \begin{bmatrix} \varepsilon_{xx} & 0 & 0 \\ 0 & \varepsilon_{yy} & 0 \\ 0 & 0 & \varepsilon_{zz} \end{bmatrix} \quad \text{Matriz de permissividade elétrica}$$

ε_{xx} Permissividade na direção x

$$[v] = \begin{bmatrix} v_x \\ v_y \\ v_z \end{bmatrix} \quad \text{Vetor de velocidade}$$

Para determinar soluções de problemas com campos magnéticos, o *Ansys* utiliza dois tipos de formulações matemáticas baseadas em funções potenciais. A primeira formulação é denominada Função *Potencial Magnética Escalar*. Desenvolvida por Gyimeisi, [18] e [19], é utilizada em problemas de magnetostática. A segunda formulação é designada “*Função Potencial Magnética Vetorial*”. Tendo por base os trabalhos de Biro, [20], este método abrange, além da análise magnetostática, as análises harmônicas e transitórias. Quando é necessária a modelização de sistemas contendo materiais com diferentes permeabilidades magnéticas, como é o caso do presente trabalho, o *Ansys* oferece uma metodologia derivada da Função Magnética Vetorial, designada Função

“Vector Potencial Magnético – baseado nas extremidades”. De acordo com [17], as formulações matemáticas aplicam-se às regiões de campo, representadas pela figura 4.3:

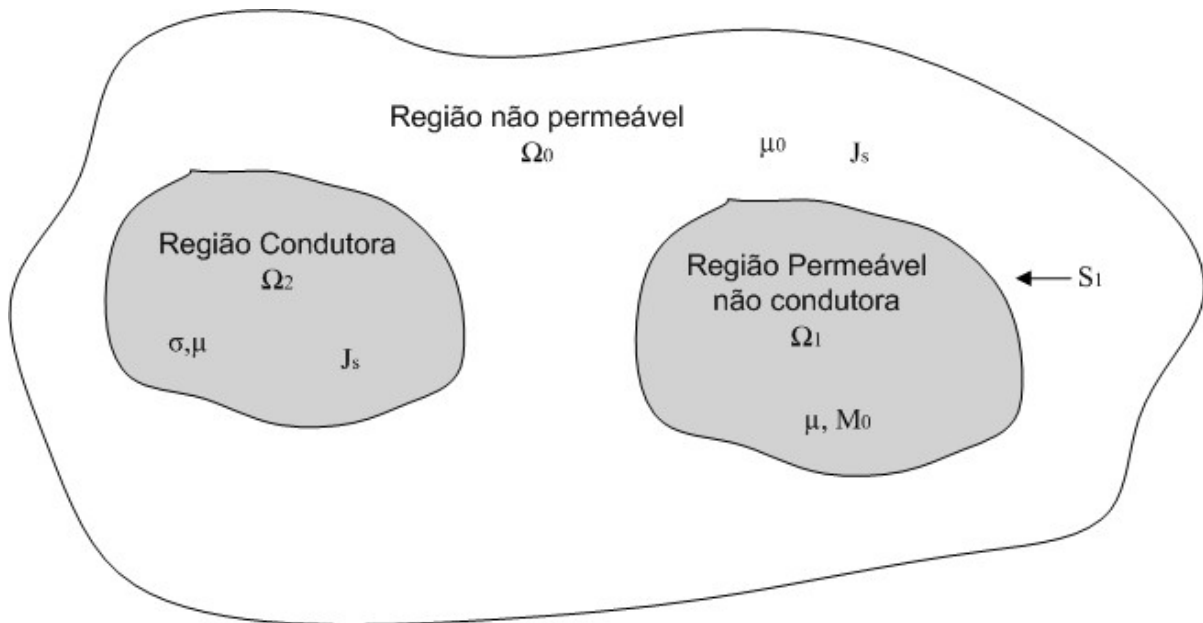


Figura 4.3 – Regiões de campo eletromagnético (extraído de [17])

As duas formulações vetoriais mencionadas, têm como pressuposto a não existência de correntes de deslocamento, pelo que as equações de Maxwell traduzidas pelas equações (4.1) a (4.4), reduzem-se às equações (4.11) a (4.13) [17]:

$$\nabla \times \bar{H} = \bar{J} \quad (4.11)$$

$$\nabla \times \bar{E} = -\frac{\partial \bar{B}}{\partial t} \quad (4.12)$$

$$\nabla \cdot \bar{B} = 0 \quad (4.13)$$

Com a introdução de potenciais, o campo magnético \bar{B} e o campo elétrico \bar{E} , podem ser expressos pelas equações (4.14) e (4.15) [17]:

$$\bar{B} = \nabla \times \bar{A} \quad (4.14)$$

$$\bar{E} = -\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} - \nabla V \quad (4.15)$$

Onde,

\bar{A} Vetor Potencial Magnético

V Potencial Magnético Escalar

A conjugação entre a introdução de funções potenciais, com a satisfação das equações (4.1) a (4.4) de Maxwell e das equações que definem as propriedades magnéticas dos materiais, (4.8), leva a que, para a formulação “Função Vector Potencial Magnético – baseado nas extremidades”, se cheguem às equações diferenciais (4.16) a (4.18) [17]:

$$\nabla \times [v]\nabla \times \bar{A} + [\sigma] \left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \nabla V \right) + [\varepsilon] \left(\frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial t^2} + \nabla \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} \right) = 0, \text{ em } \Omega_2 \quad (4.16)$$

$$\nabla \cdot \left([\sigma] \left(\frac{\partial \bar{A}}{\partial t} + \nabla V \right) + [\varepsilon] \left(\frac{\partial^2 \bar{A}}{\partial t^2} + \nabla \frac{\partial \bar{V}}{\partial t} \right) \right) = 0, \text{ em } \Omega_2 \quad (4.17)$$

$$\nabla \times [v]\nabla \times \bar{A} = \bar{J}_s + \nabla \times \frac{1}{v_0} [v]\bar{M}_0, \text{ em } \Omega_0 + \Omega_1 \quad (4.18)$$

O processo de discretização das funções presentes equações, é concretizado pelo método iterativo *Newton-Raphson* [17]. Em relação à resolução do sistema de equações diferenciais, o *software* aborda metodologias diferentes, consoante se trate de uma análise estática, harmónica, ou transitória. No caso mais complexo da modelização do DTAV, a análise transitória, onde existe a necessidade de resolução de equações diferenciais de 2ª ordem (4.16), a metodologia utilizada é a de Newmark [17].

Na modelização do sistema DTAV foi utilizado um elemento finito tridimensional de 10 nós, denominado SOLID237, Figura 4.4, na nomenclatura do *Ansys*.

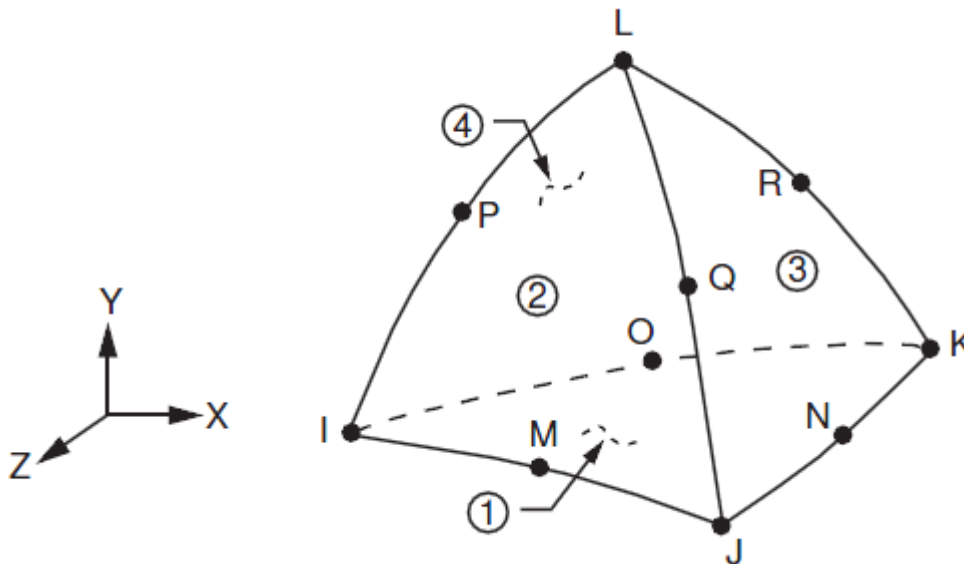


Figura 4.4 - Formato do elemento Solid237 (extraído de [22])

Além do elemento Solid237 permitir a realização de análises estáticas, harmônicas e transitórias, tem ainda a capacidade de ser associado a materiais com propriedades magnéticas lineares e não lineares, como é o caso dos ímanes permanentes. Adicionalmente, permite a modelização de uma bobine excitada por uma densidade de corrente. Na modelização dos circuitos elétricos inseridos no Sistema DTAV, foi utilizado o elemento CIRCU124 [22], capaz de simular os elementos básicos de um circuito elétrico, como sejam, fontes de tensão, resistências, etc., capazes de interagir com elementos finitos, neste caso o SOLID237, com graus de liberdade magnéticos.

4.3 Conclusão

Neste capítulo foi apresentada uma breve descrição sobre o MEF, realçando a sua importância e aplicabilidade nas diferentes áreas do conhecimento.

O software de MEF Ansys apresentou-se como uma boa opção para a modelização e análise de sistemas no domínio do eletromagnetismo, dada a fundamentação teórica nas equações físicas do eletromagnetismo em que se sustenta, como também as formulações matemáticas disponibilizadas, consoante o tipo de análise pretendido, a saber, a Função Potencial Magnética Escalar, vocacionada para problemas de magnetostática e a Função Potencial Magnética Vetorial, utilizada nas análises harmónica e transitória.

A decisão de recurso ao MEF, deve ser baseada na ponderação entre o tempo despendido no desenvolvimento e a mais-valia que poderá trazer aos interessados, relevando-se muitas vezes ser uma opção pouco razoável. Todavia, no que se refere ao sistema DTAV e dadas as especificidades funcionais de segurança que desempenha, a utilização do MEF para a sua modelização e consequente aumento do conhecimento do funcionamento do sistema, torna-se de forma inequívoca, uma opção viável a ser tida em conta.

CAPÍTULO 5

MODELIZAÇÃO DO SISTEMA DTAV

Resumo

Neste capítulo é descrito o processo de desenvolvimento do modelo propriamente dito. São apresentados os diferentes passos tomados, na construção do modelo e os consequentes resultados alcançados.

5 MODELIZAÇÃO DO SISTEMA DTAV

A principal dificuldade encontrada no desenvolvimento do modelo, deveu-se ao fato da documentação técnica existente sobre o sistema DTAV ser escassa, principalmente em relação às especificações técnicas de construção. Dada a impossibilidade verificada em obter os dados diretamente do fornecedor, adotou-se o procedimento onde, sempre que se desconhecia algum parâmetro de construção, assumia-se um outro que conseguisse cumprir com o princípio de funcionamento do sistema.

Um outro aspeto em consideração, foi o da definição concreta daquilo que iria ser modelizado pelo método dos elementos finitos. Assim, decidiu-se confinar o modelo à interação eletromagnética entre a baliza e o captor do DTAV. Todas as funcionalidades internas das cartas eletrónicas de processamento, instaladas a bordo do comboio, bem como o circuito de modelação do sinal permissivo da baliza de DTAV, localizado no cofre de via, não foram alvo de modelização.

Finalmente houve a preocupação prévia de definir os ensaios que permitissem validar o modelo desenvolvido. A validação assentaria no cumprimento da especificação [23]. Evidenciada na Figura 5.1, a baliza de DTAV deverá produzir um campo magnético estático (condição proibitiva) que permita obter um valor igual, ou superior a $13 \times 10^{-4}T$, a 0,120m de distância da baliza, um comprimento compreendido entre 0,305 e 0.325m.

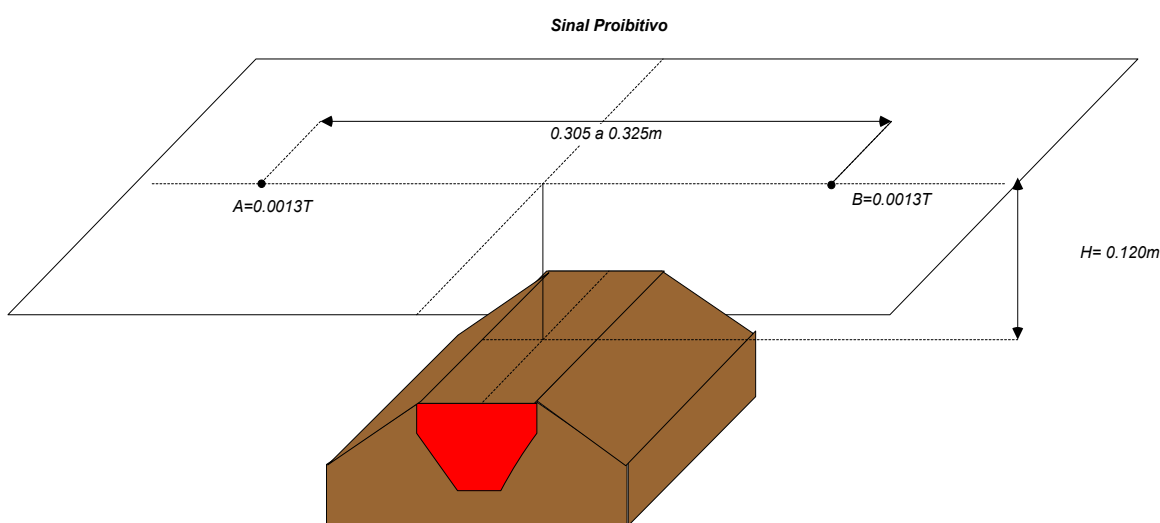


Figura 5.1 - Zona de Influencia do campo magnético estático da baliza (extraído de [23])

De [23], refere-se igualmente que a tensão do sinal de 8kHz, presentes nos terminais das bobinas do núcleo saturável do captor, deveria ser de 0Vpp, num comprimento mínimo de 0,425m, com o captor a 0,120m de distância da baliza. Relativamente ao sinal permissivo, emitido pela baliza (4510Hz), este teria uma corrente de 0,100A, e seria capaz de gerar, aos terminais da bobinas captoras, um sinal com uma tensão mínima de 0,250Vpp, num comprimento mínimo de 0,900m, com o captor a 0,120m de distância da baliza, Figura 5.2:

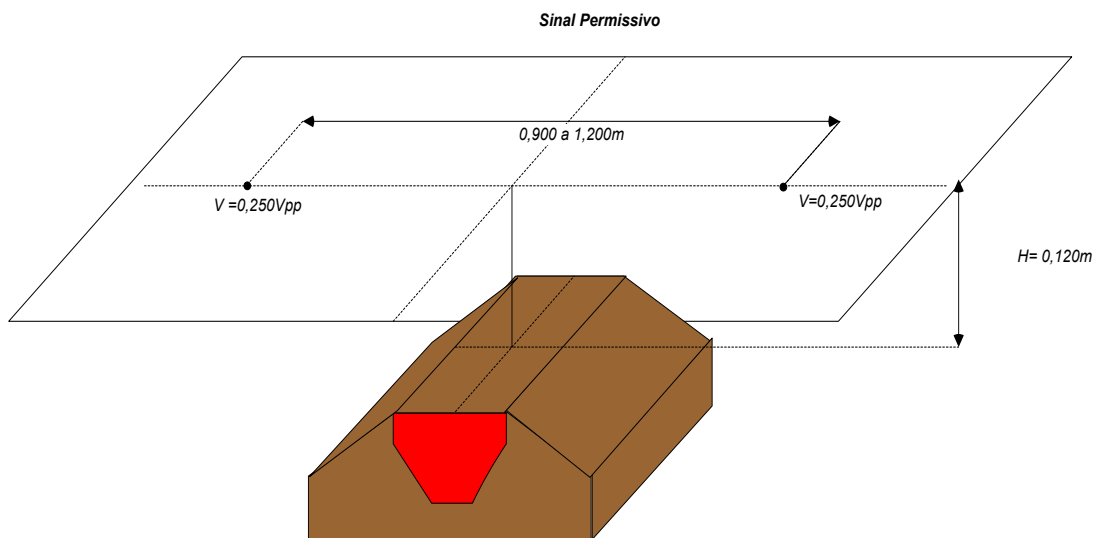


Figura 5.2 – Zona de influência da condição permissiva da baliza (extraído de [23])

5.1 Ensaios Prévios

Para a auxiliar a compreensão da interação do captor com a baliza, foram realizados um conjunto de ensaios prévios, que permitissem averiguar quais as grandezas dos sinais elétricos presentes no captor. Esses ensaios foram realizados nas instalações do ML, no laboratório de eletrónica, onde normalmente são efetuadas reparações de alguns equipamentos dos comboios. Com o auxílio de uma bancada de ensaios do DTAV, habitualmente utilizada para o teste de funcionamento das placas eletrónicas do DTAV, e de um osciloscópio, procurou-se determinar as tensões dos sinais elétricos presentes no captor, na condição “fora da zona de influência da baliza” e “sobre a influência da baliza”.

O primeiro ensaio realizado consistiu na averiguação da tensão elétrica do sinal de 8kHz, presentes aos terminais das bobinas de núcleo saturável do captor, numa condição em que o referido captor se encontra fora da zona de influência da baliza. Neste ensaio, evidenciado na Figura 5.3, verificou-se a presença de um sinal elétrico sinusoidal de $7627 \pm 1\text{Hz}$ com uma tensão de $29.16 \pm 0,05\text{Vpp}$, aos terminais de saída do circuito oscilador. É de notar que, apesar de habitualmente se referir que a frequência do sinal presente no núcleo saturável do captor ser de 8 kHz, esta na realidade, pode variar entre os 6kHz e os 8kHz, dependendo das tolerâncias dos componentes eletrônicos do circuito oscilador. Uma vez que o objetivo passa pela modelização da interação eletromagnética entre o captor e a baliza, mediu-se a tensão elétrica aos terminais das bobinas de núcleo saturável, obtendo-se o mesmo sinal de $7627 \pm 1\text{Hz}$, mas com um valor de tensão elétrica de $1,5 \pm 0,05\text{Vpp}$ e uma forma de onda não sinusoidal, evidenciada na Figura 5.4. Este é o sinal de referência, a partir do qual se iria aferir a validade do modelo na condição “captor fora da zona de influência da baliza”.

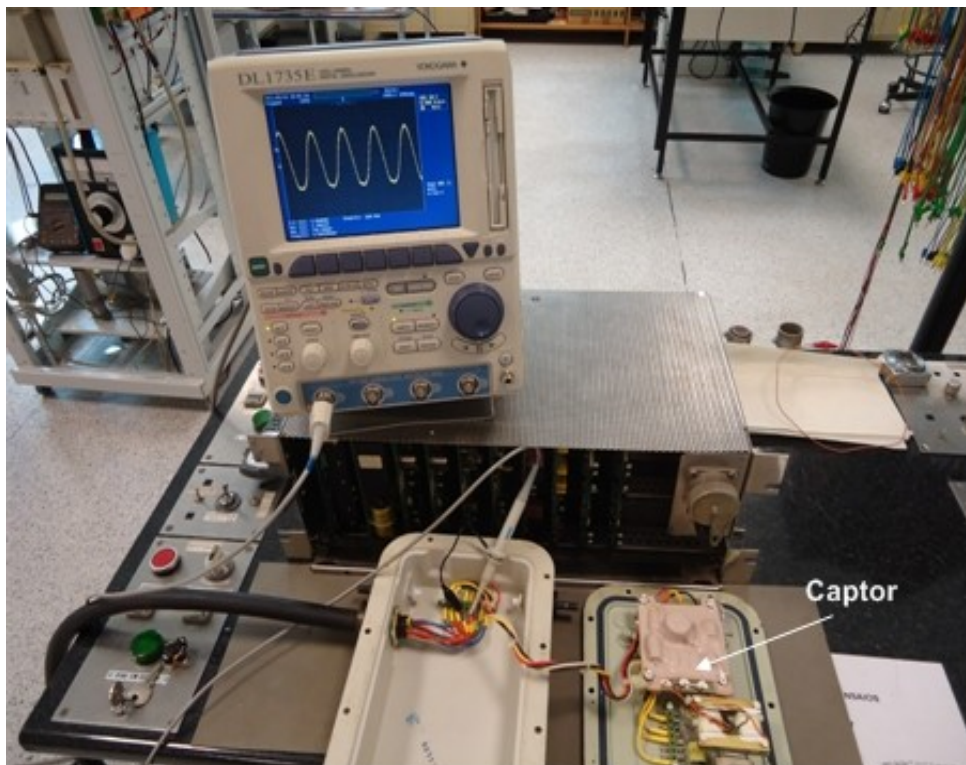


Figura 5.3 -Ensaio do Captor fora da zona de influência da baliza

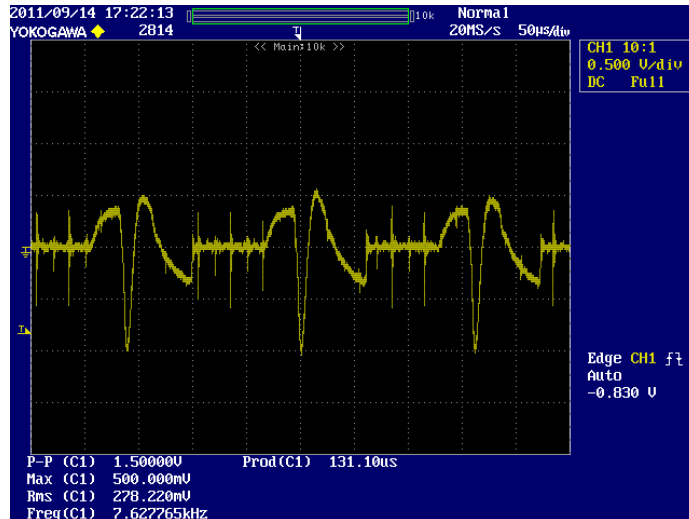


Figura 5.4 – Sinal elétrico presente nas bobinas de núcleo saturável

O segundo ensaio prévio realizado consistiu na medição das mesmas grandezas elétricas no captor, mas desta vez, sobre a influência da baliza, Figura 5.5. Nesta condição, o valor de tensão elétrica aos terminais das bobines de núcleo saturável foi de $0 \pm 0,05 \text{Vpp}$.

Foi ainda realizada uma segunda medição, desta vez nos terminais das bobines captoras do sinal permissivo (4510Hz), proveniente da baliza. Registou-se um valor de $2,0 \pm 0,05 \text{Vpp}$.

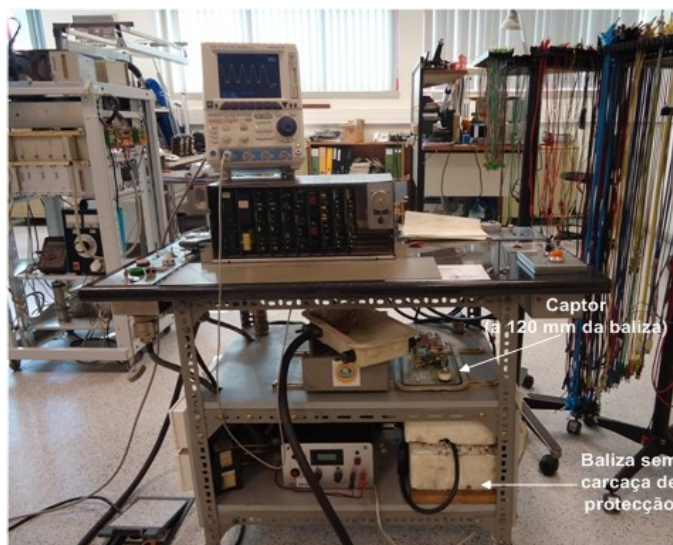


Figura 5.5 - Ensaio da baliza sobre a influência da baliza

Finalmente, foi conduzida, a título de registo, uma medição da densidade de fluxo magnético, gerado pela baliza de DTAV, a $0,120 \pm 0,005\text{m}$ de distância, tal como é habitualmente realizado nas ações de manutenção preventiva do ML, Figura 5.6.

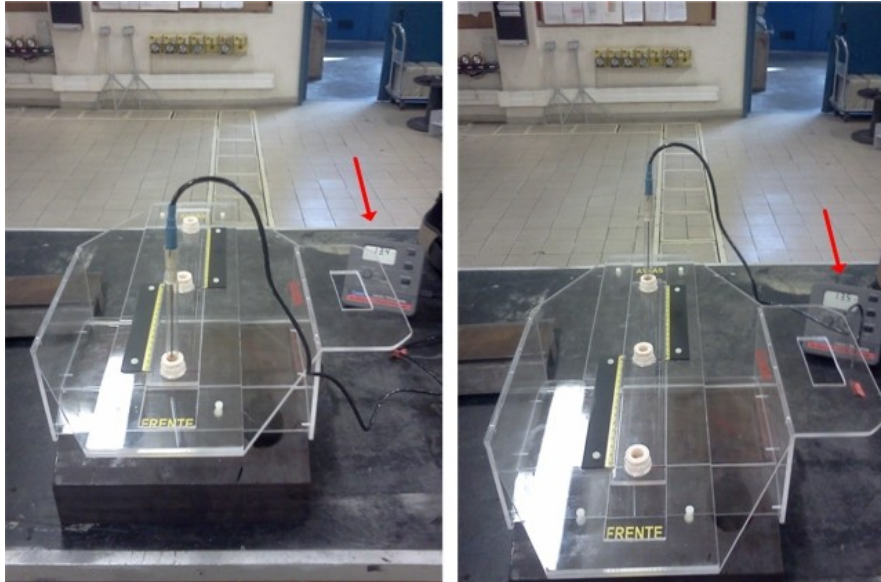


Figura 5.6 – Ensaio de medição do campo magnético da baliza de DTAV

Foi utilizado um suporte próprio (Figura 5.6) e um gaussímetro BELL 5070. Tal como esperado, os valores medidos, comprovam a especificação [23] do fornecedor, ou seja, foram medidos valores de densidade de fluxo magnético iguais, ou superiores a $13 \times 10^{-4}\text{T}$, num comprimento de $0,305 \pm 0,005\text{m}$, a uma distância de $0,120 \pm 0,005\text{m}$ da baliza.

5.2 Análise da Condição Proibitiva do DTAV

O primeiro passo realizado consistiu na construção do modelo geométrico da baliza de DTAV, de acordo com as especificações do fabricante, [23]. O desenho de especificação, refere as principais dimensões e os constituintes da baliza. Constituída essencialmente por 6 ímanes permanentes cilíndricos, de material Ticonal G, [24], e dois cilindros de material ferromagnético, não especificado, estes elementos agrupados em série, ligam-se a duas chapas laterais, também de material ferromagnético não especificado, constituindo o circuito magnético, do lado da baliza, responsável pela geração e direcionamento do

campo magnético estático (condição proibitiva), Figura 5.7. Envolvendo os cilindros ferromagnéticos e os ímanes permanentes existe uma bobine, alimentada por um sinal de 4510 Hz (sinal permissivo), responsável pela emissão do campo eletromagnético permissivo. A referida bobine apenas foi contemplada no modelo, no momento da análise do sinal permissivo. Envolvendo estes componentes, existe um revestimento de madeira habitualmente designado por “miolo”.

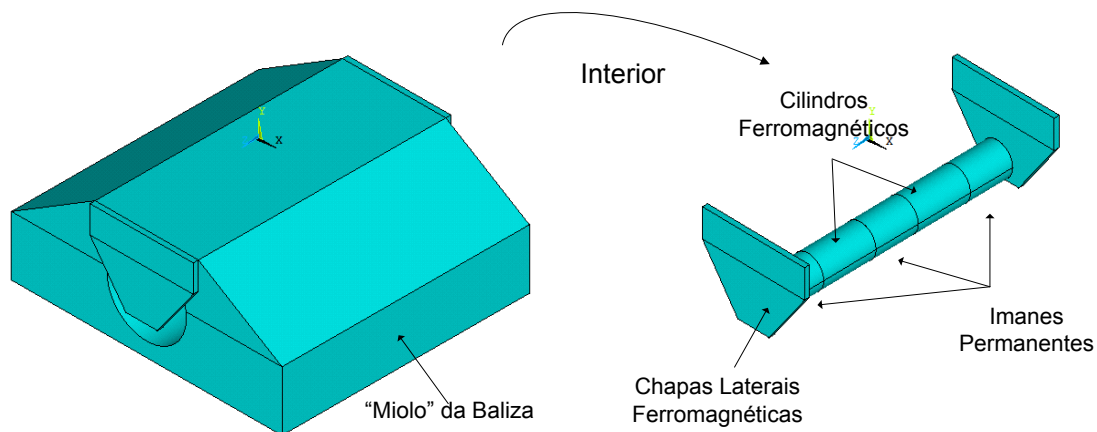


Figura 5.7 – Constituição da baliza de DTAV

Para evidenciar os passos mais importantes no código fonte, relativos à fase de pré-processamento, mais concretamente, na construção do modelo geométrico, é apresentado seguidamente uma descrição comentada, utilizando, como exemplo, alguns comandos utilizados no *Ansys APDL*:

Para a criação do modelo geométrico, através da linguagem *APDL*, começou-se por definir as coordenadas dos vértices de todos os sólidos, com a exceção dos cilíndricos. Como exemplo, os comandos *APDL* seguidamente apresentados, foram utilizados definição dos vértices, do invólucro protetor da baliza, habitualmente designado por “miolo”:

!DEFINIÇÃO DOS KEYPOINTS DO MIOLO DA BALIZA

K,1,0,0,0 !Define o vértice (Keypoint) nº 1 nas coordenadas xyz (0,0,0)

K,2,0,0,290 !Define o vértice (Keypoint) nº 2 (0,0,290)

K,3,317,0,290 !Define o vértice (Keypoint) nº 3 (317,0,290)

K,4,317,0,0 !Define o vértice (Keypoint) nº 4 (317,0,0)

K,5,0,70,0

K,6,0,70,290

K,7,317,70,290

K,8,317,70,0

K,9, 98,130,0

K,10,98,130,290

K,11,219,130,290

K,12,219,130,0

Após a definição dos vértices dá-se à criação dos volumes. Neste exemplo, o miolo será construído da adição de dois volumes:

!Criação dos volumes do miolo da baliza

V,1,2,3,4,5,6,7,8 !Criação do Volume 1 com os vértices 1 a 8

NV1=1 !Variável Identificação do volume

V,5,6,7,8,9,10,11,12 !Criação do Volume 2 com os vértices 5 a 12

NV2=2 !Variável de identificação do volume

!Adição dos volumes 1 e 2

VADD,NV1,NV2 !Adiciona volumes criando um novo

VDELE, NV1, NV2, 1, 1 !Elimina os dois volumes originais

Este procedimento é realizado para os restantes volumes do modelo geométrico. Posto isto, dá-se á definição dos materiais utilizados. Dada a pouca informação existente acerca dos materiais constituintes da baliza de DTAV, decidiu-se definir os componentes da baliza com materiais existentes atualmente no mercado com características magnéticas que se aproximassem do comportamento pretendido. Relativamente ao Ticonal G, trata-se de um íman permanente da classe dos alnicos, muito utilizado até à década de 70 (séc. XX), antes do desenvolvimento dos ímanes permanentes de terras raras. Atualmente encontram-se um pouco em desuso, uma vez que se encontram no mercado ímanes com uma relação Força coerciva (H) versus Campo Magnético remanescente (B) muito superiores. De acordo com [25] podem-se representar esquematicamente, Figura 5.8, as

dimensões equivalentes de cada tipo de íman permanente para se obter a mesma relação da curva de magnetização.

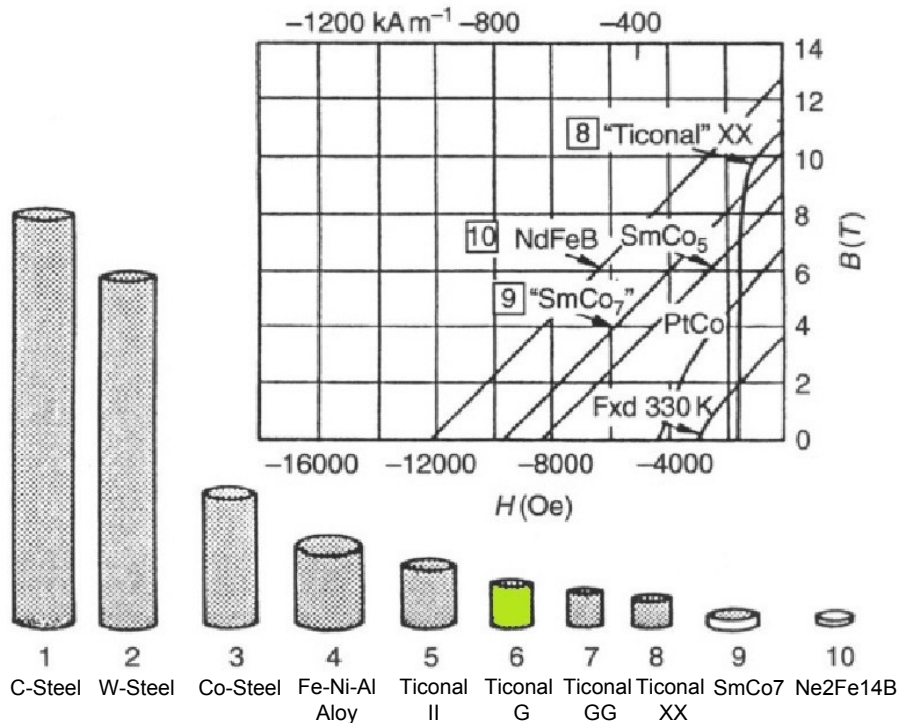


Figura 5.8 – Representação esquemática da relação entre diferentes tipos de materiais magnéticos e suas dimensões equivalentes (extraído de [25])

Para a definição no *Ansys*, da curva de magnetização do material Ticonal G, optou-se por utilizar os dados do Ticonal 600, designação utilizada no catálogo [26], de um fabricante de ímanes permanentes da atualidade, em substituição do Ticonal G. Em relação ao material ferromagnético da baliza (cilindros e chapas laterais), responsáveis pelo direcionamento da linhas de fluxo magnético originárias dos ímanes permanentes, optou-se por escolher o FeCo35, presente na biblioteca de materiais magnéticos do Ansys Workbench.

Não havendo na documentação disponível do DTAV, uma referência ao tipo de material, a opção teria de passar pela escolha de um material ferromagnético conhecido que não comprometesse os resultados finais. Para tal, teria de ser um material com uma elevada permeabilidade magnética que direcionasse o máximo de linhas de fluxo magnético para o captor.

Relativamente ao material do miolo, a madeira, este não apresenta características magnéticas relevantes, não estando incluído nas famílias de materiais com comportamento magnético relevante, como seja o ferromagnetismo, paramagnetismo e o diamagnetismo. O componente “miolo” poderia ser assim negligenciado, dado o seu insignificante efeito na interação magnética do modelo. Todavia, decidiu-se, numa primeira abordagem incluí-lo no modelo, mas com uma característica magnética igual à do vácuo. Esta decisão teve por base o facto da possibilidade de, em análises futuras, surgir a necessidade de simular o componente miolo com um outro tipo de material.

Para evidenciar a fase de definição dos materiais na linguagem APDL, utiliza-se novamente o exemplo do miolo da baliza. Inicialmente é definido o elemento finito e o correspondente material:

!Definição do elemento finito

ET,1,SOLID237 !Define o elemento 1 do tipo Solid237 (ver Figura 4.4)

KEYOP,1,7,1 !Graus de liberdade (variáveis a calcular) do elemento
!(variável potencial magnético escalar)

!Definição dos materiais

pi=acos(-1) !Definição da constante π

mu0=4*pi*1e-7 !Definição da constante de permeabilidade magnética do vácuo

mu0r=1 !Definição da constante de permeabilidade relativa

!Definição da característica magnética do ar, utilizado no volume miolo

MP,MURX,1,mu0r !Define a permeabilidade magnética relativa do elemento 1 na
!direcção x

MP,MURY,1,mu0r !Define a permeabilidade magnética relativa do elemento 1 na
!direcção y

MP,MURZ,1,mu0r !Define a permeabilidade magnética relativa do elemento 1 na
!direcção z

Feita a definição do material, este é atribuído ao volume desejado, neste caso, ao Miolo:

VSEL,S,VOLU,,MIOLO !Seleciona o volume Miolo

VATT,1,1,1 !Atribui o material 1 ao volume

Este processo é aplicado a todos os materiais e volumes criados.

Tendo definido os componentes da baliza, nomeadamente o seu modelo geométrico e os materiais envolvidos, foi necessário criar um componente fictício, denominado sonda,

Figura 5.9, que permitisse visualizar a distribuição de campo, no momento da simulação. A referida sonda estaria situada a uma distância da baliza de 0,120 m e com um comprimento de 0,305m. Desta forma, consegue-se aferir, de uma forma visual a condição proibitiva, evidenciada na Figura 5.1.

1

ANSYS

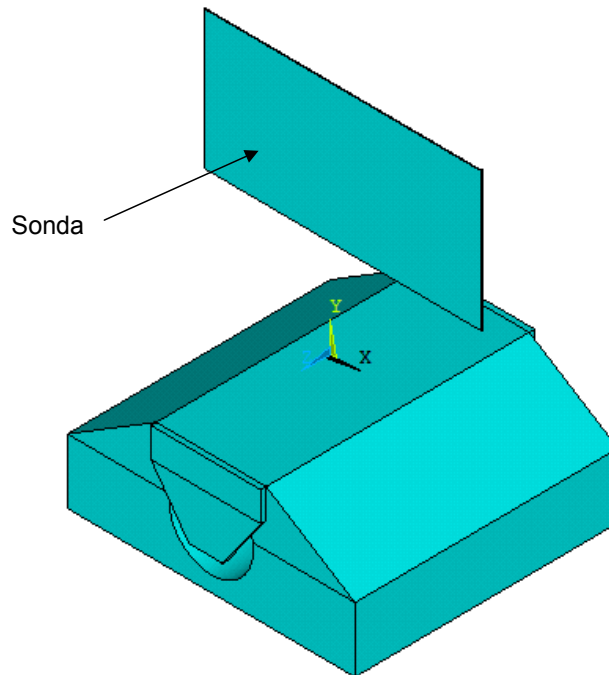


Figura 5.9 – Modelo geométrico constituído pela Baliza e a sonda

Antes de iniciar o cálculo da solução do modelo foi necessário definir as condições de fronteira do sistema. Neste caso, tratando-se de uma análise magnetostática, foi definido no código fonte do modelo, uma esfera de 580 mm de raio, cuja superfície teria um campo magnético nulo. A escolha do raio teve de ser ponderada mediante a análise dos seguintes fatores: do ponto de vista do tempo de cálculo da solução a esfera deveria ser o mais pequena possível, reduzindo o número de elementos finitos. Em contraposição, quanto mais pequena ela fosse, menor seria o grau de precisão da solução, uma vez que quanto menor fosse a distância entre a esfera e a sonda, mais baixos seriam os valores

obtidos de campo magnético, na referida sonda, dada a condição de campo magnético nulo imposta na esfera.

Estando o modelo geométrico definido, passou-se à definição da malha de elementos finitos do modelo, Figura 5.10. Nesta fase, o *Ansys* calcula automaticamente a disposição dos nós e elementos da malha. Resta ao utilizador definir o grau de refinamento da malha.

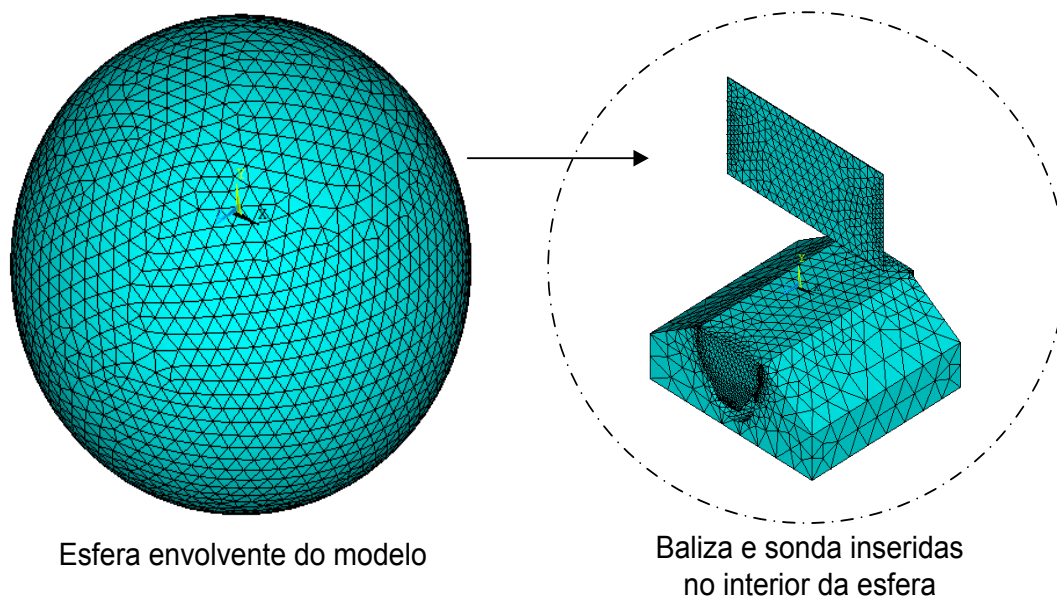


Figura 5.10 – Malha de elementos finitos do modelo Baliza-sonda

Em termos práticos, o *Ansys*, disponibiliza um conjunto de comandos que permite definir o número de elementos adjacentes a cada linha do modelo geométrico. No caso concreto do modelo, definiu-se um refinamento na sonda, de 20 elementos adjacentes por linha, o que resulta uma distância média entre nós de 0.015m, ao longo do comprimento da sonda (0,305m). Este refinamento foi aplicado aos volumes cuja precisão da solução a calcular, teria de ser mais elevada. É o caso da sonda, onde seria calculado os valores da densidade de fluxo magnético e todos os volumes pertencentes ao circuito magnético, ímanes e materiais ferromagnéticos. No caso do miolo, o refinamento seria menor dado não ter grande influência no direcionamento das linhas de fluxo magnético, uma vez que tinha sido caracterizado com a característica magnética do ar. Utilizando - o mais uma vez, a título exemplificativo:

```

ESIZE,0,10          !Define o refinamento da malha a ser criada
VMESH, MIOLO, MIOLO, 1    !Cria a malha para o miolo

```

Em relação às condições de fronteira impostas, mencionadas anteriormente, a sua aplicação no modelo consistia na seleção de todos os nós no exterior da esfera e na consequente imposição de uma densidade de fluxo magnético nula:

!Condições de fronteira

```

ALLSEL      !Seleciona todos os nós e elementos
nselect,s,ext    !Seleciona apenas os nós exteriores do modelo (esfera)
d,all,az,0      !Aplica a condição "Magnetic Flux parallel" = 0

```

Posto isto, deu-se início ao cálculo da solução do modelo. Neste caso a grandeza a ser calculada seria a distribuição do campo magnético no modelo. O código fonte completo do modelo, da análise magnetostática, encontra-se no anexo 1.

Os primeiros resultados obtidos são evidenciados na Figura 5.11. Constituída por duas vistas, perspectiva lateral e isométrica, é possível visualizar a distribuição de campo magnético em toda a extensão da sonda.

Como se pode verificar, pelos valores de amostragem evidenciados na margem inferior da sonda, o campo magnético apresenta um valor de 0.001479 T, com um erro de 14 %, relativamente ao mínimo especificado em [23].

Para consolidar o modelo, foram realizados à posterior um conjunto de medições experimentais, nas instalações do ML, que permitissem validar com maior rigor os resultados evidenciados na Figura 5.11. O ensaio consistiu em medir com um gaussímetro o campo magnético presente numa janela de 0,305m, a distâncias entre 0,120m a 0,200m.

As medições efetuadas são evidenciadas no gráfico da Figura 5.12. Comparando os valores de campo magnético obtidos na simulação com os resultados medidos experimentalmente, verificou-se que estes se aproximam, sendo o erro médio inferior a 10%. De salientar que este erro médio teve em consideração a medição do campo magnético em várias balizas em bom estado de conservação.

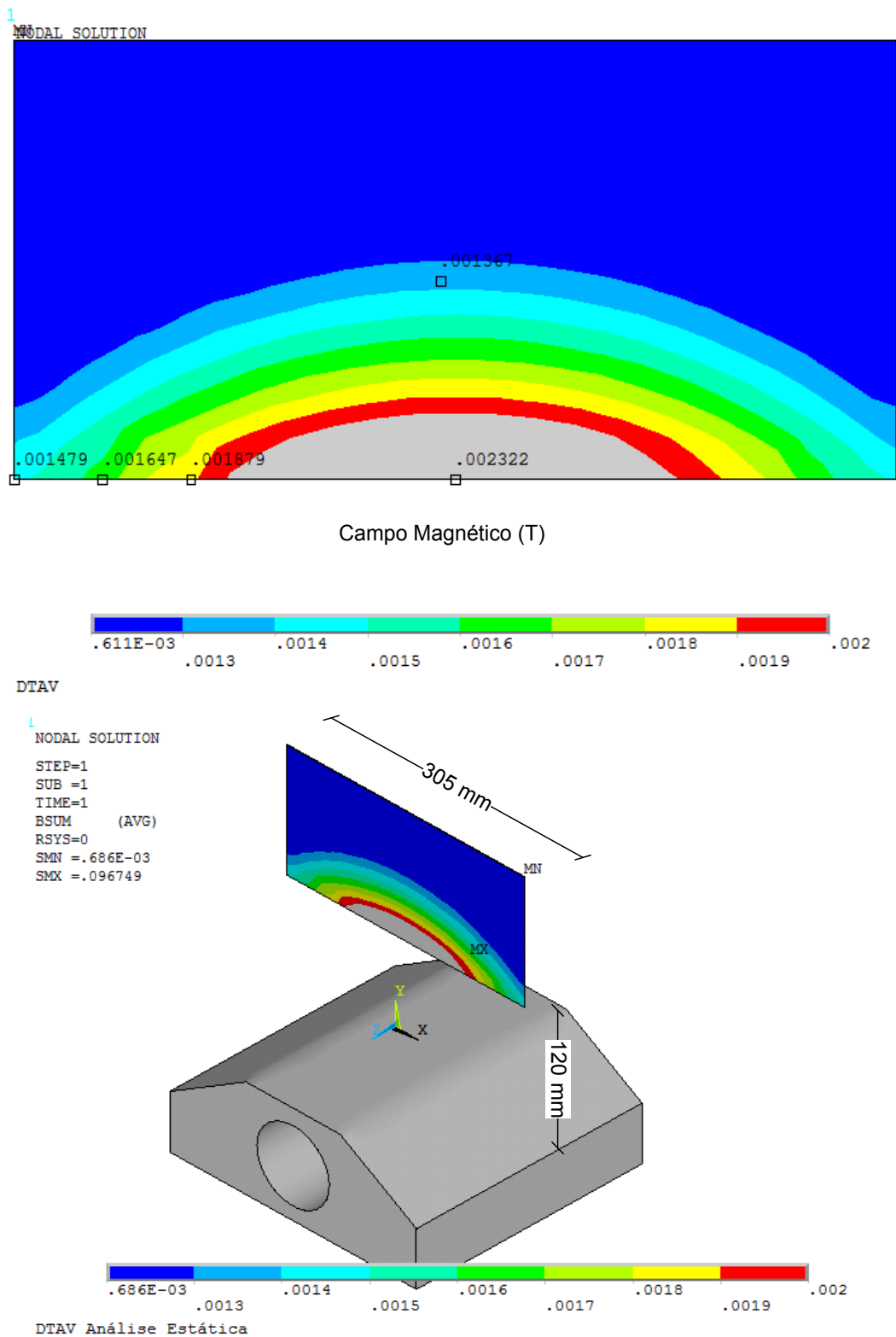


Figura 5.11 – Distribuição do campo magnético ao longo de 0,305m a 120mm de distância da baliza

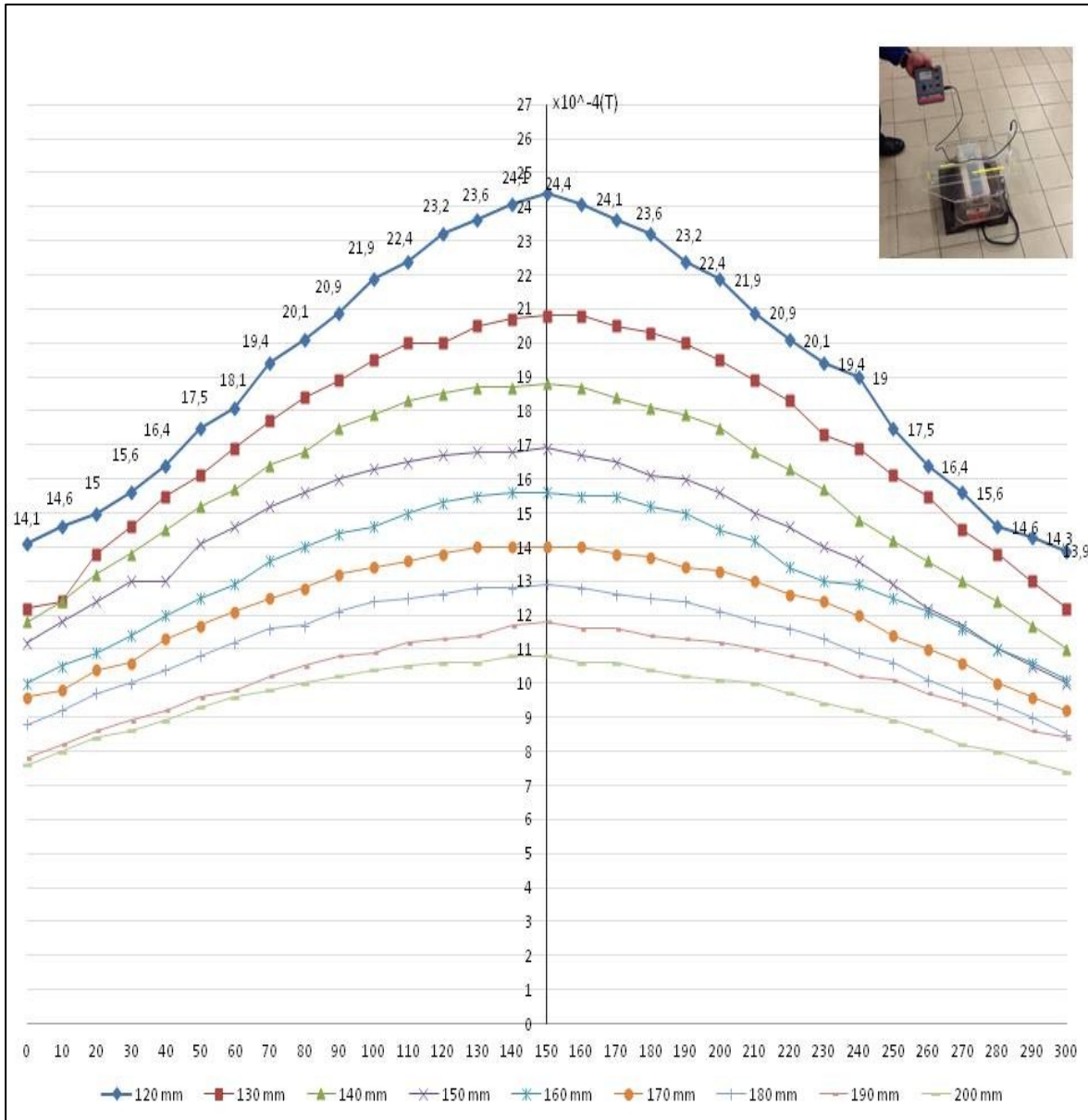


Figura 5.12 – Medições de campo magnético efetuadas experimentalmente a distâncias entre 0.120m e 0.200m de distância da baliza

Realizou-se seguidamente uma rotação de 90 graus à disposição da sonda, de forma a se apresentar transversalmente, em relação à baliza (Figura 5.13). Esta ação permitiu visualizar o efeito que as chapas laterais têm, no direcionamento do campo magnético. Verificou-se que, a intensidade do campo magnético é superior nas imediações das chapas laterais, relativamente aos valores apresentados, à mesma distância, no centro da baliza, zona por onde passa o captor. Esta evidência sugere que, mesmo que o captor

passa inadvertidamente sobre a baliza ligeiramente descentrado, o risco de não detecção do campo magnético proibitivo, por parte do captor, é reduzido.

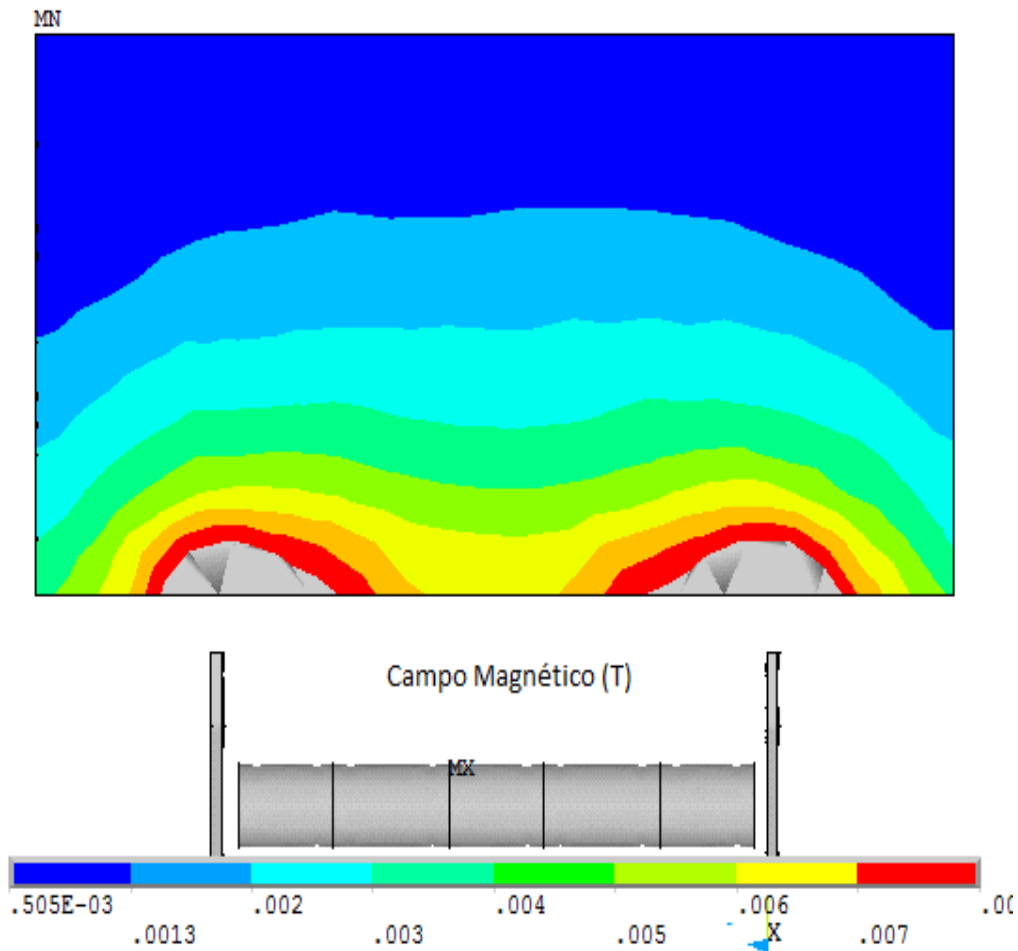


Figura 5.13 – Distribuição do campo magnético utilizando uma sonda transversal

Para se caracterizar o comportamento magnético no interior da baliza, apresenta-se o gráfico vetorial do campo magnético, na Figura 5.14. Verificou-se uma grandeza de valores de campo magnético superiores, relativamente aos presentes na sonda, Figura 5.11. Além disso, a presença do material ferromagnético direciona as linhas de fluxo magnético, impedindo que se fechem isoladamente nas extremidades de cada íman permanente.

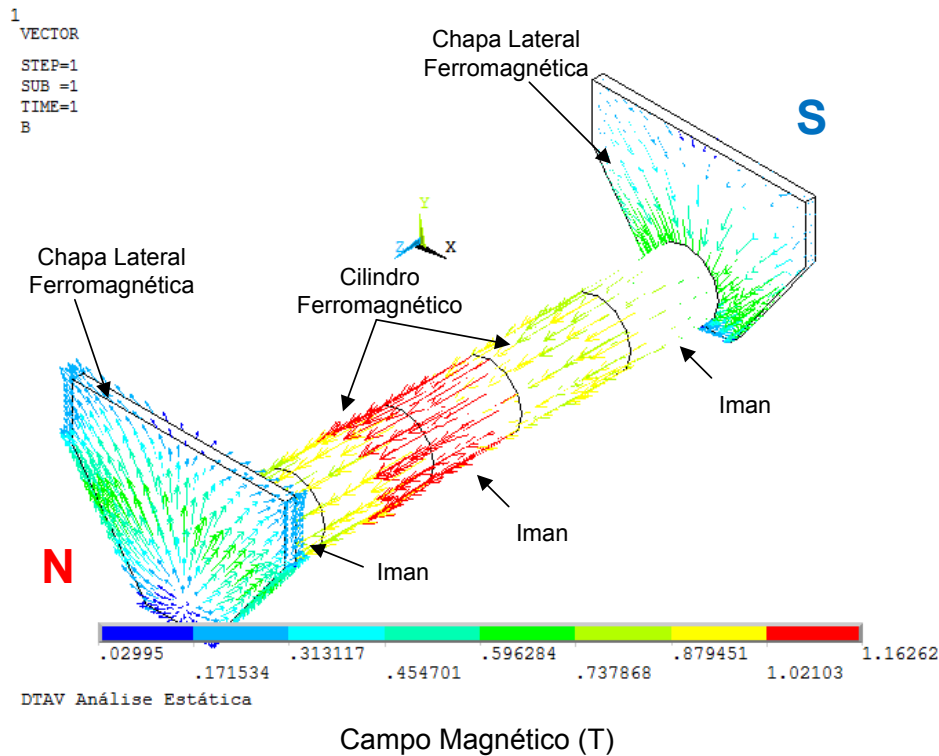


Figura 5.14 – Gráfico vetorial do campo magnético no interior da baliza

Uma das vantagens que os modelos tridimensionais têm relativamente aos de duas dimensões, é o da perspectiva que oferece na visualização do sistema em análise. Aplicado ao DTAV é possível, com o atual modelo de elementos finitos, visualizar qual a zona de influência que a baliza de DTAV tem, tendo como referência o valor mínimo de 0,0013T. Se for tomado como pressuposto que o campo magnético especificado, é o valor mínimo aceitável para a deteção, por parte do captor do comboio, é possível criar uma superfície, nas imediações da baliza que defina os limites de influência admissíveis da baliza. A referida superfície é evidenciada na Figura 5.15.

De acordo com os valores obtidos no cálculo da superfície, são suscetíveis de se detetarem campos magnéticos com valores iguais ou superiores a 0.0013T, até uma distância da baliza de 0,180m. É de notar, que a essa distância, não se verifica a condição de um comprimento mínimo de 0,305m, com valores de campo iguais ou superiores a 0.0013T. Uma possível interpretação destes dados poderá ser que o valor do comprimento de 0,305m estará associado ao tempo necessário para a deteção do campo magnético, pelos circuitos eletrónicos de processamento do comboio, quando este se

desloca à velocidade máxima. Considerando uma velocidade máxima de circulação do ML, de 16,7 m/s (60 km/h), são necessários 0,0183s para o comboio percorrer a distância de 0,305m. É bem provável que este tempo mínimo (0,0183s) esteja associado a uma elevada margem de tolerância, situação bastante habitual no desenvolvimento destes sistemas de segurança. Basta considerar que qualquer circuito eletrónico dimensionado para detetar um sinal elétrico com uma frequência de 8000Hz (condição proibitiva), com um período de, $1,25 \times 10^{-4}$ s, não necessite de um tempo de análise e processamento na ordem dos 0,018s (ordem de grandeza 100 vezes superior). Este fato leva a colocar a hipótese de que o sistema DTAV tenha sido projetado para funcionar com comboios que circulem a uma velocidade superior a 16,7 m/s (60 km/h), dispondo mesmo assim de margens de tolerância associadas.

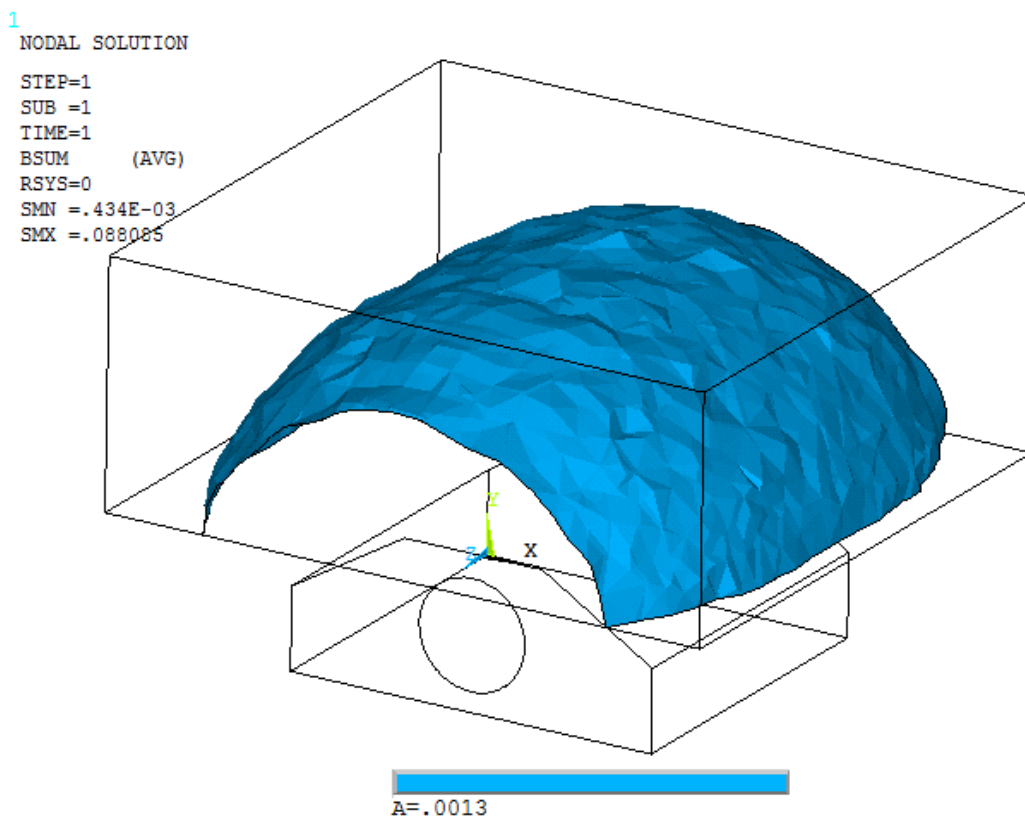


Figura 5.15 – Superfície com um campo magnético de 0.0013T

Para tentar comprovar esta hipótese, foi aproveitada a oportunidade de participar num conjunto de ensaios dinâmicos, em Novembro de 2012, muito embora estes ensaios não tenham sido realizados propositadamente para validar a hipótese formulada. Nesse conjunto de ensaios, foi possível testar o funcionamento da baliza do DTAV a distâncias variáveis do captor, com o comboio a circular a $16,7 \pm 0,3 \text{ m/s}$, Figura 5.16.



Figura 5.16 – Ensaio dinâmico do sistema DTAV com um comboio a circular a $16,7 \pm 0,3 \text{ m/s}$

Uma das condições ensaiadas foi o ajuste da distância baliza-captor para $0,180 \pm 0,05 \text{ m}$. De acordo com as medições evidenciadas na Figura 5.12, a esta distância só se mediu um valor de $0,0013 \pm 0,0001 \text{ T}$, quando a sonda se encontrava praticamente centrada. A janela de medição do referido valor foi de $0,010 \pm 0,005 \text{ m}$. Verificou-se, que nestas condições, o comboio foi travado, quando passou sobre a baliza a $16,7 \pm 0,3 \text{ m/s}$. Esta evidência leva a concluir que de fato, a janela de $0,305 \text{ m}$ com um campo magnético mínimo de $0,0013 \text{ T}$, especificada pelo fornecedor, foi dimensionada para velocidades superiores a $16,7 \text{ m/s}$.

O próprio valor de campo magnético de $0,0013 \text{ T}$ apresenta uma tolerância considerável, se tomarmos como referência a velocidade máxima de circulação de $16,7 \text{ m/s}$. Esta

afirmação é justificada pelo facto de nos ensaios dinâmicos, o comboio ter sido travado para distâncias entre a baliza e o captor de $0,220 \pm 0,05\text{m}$. Consultando os resultados do modelo criado, utilizados na construção do gráfico da Figura 5.11, verifica-se o valor de campo magnético máximo, para a distância de $0,220 \pm 0,05\text{m}$ é de $0,0009 \pm 0,00001\text{T}$. Assim, o valor de $0,0013\text{T}$ especificado em [23] tem uma tolerância mínima de 30%, para uma velocidade de circulação de $16,7 \pm 0,3\text{m/s}$ (60 km/h).

5.2.1 Análise da interação baliza-captor

Para que o modelo cumprisse todas as especificações inerentes à condição proibitiva do DTAV, era necessário simular a interação baliza-captor. Foi então substituída no modelo, a sonda pelo captor propriamente dito. A Figura 5.17 apresenta o aspeto do modelo geométrico do captor construído, estando evidenciada a disposição das bobinas de núcleo saturável e dos ímanes permanentes, responsáveis por gerar um campo magnético capaz de impor ao núcleo das bobinas um funcionamento perto da saturação. Estão igualmente representadas as bobinas captoras, cuja sua função será analisada na secção 5.3.

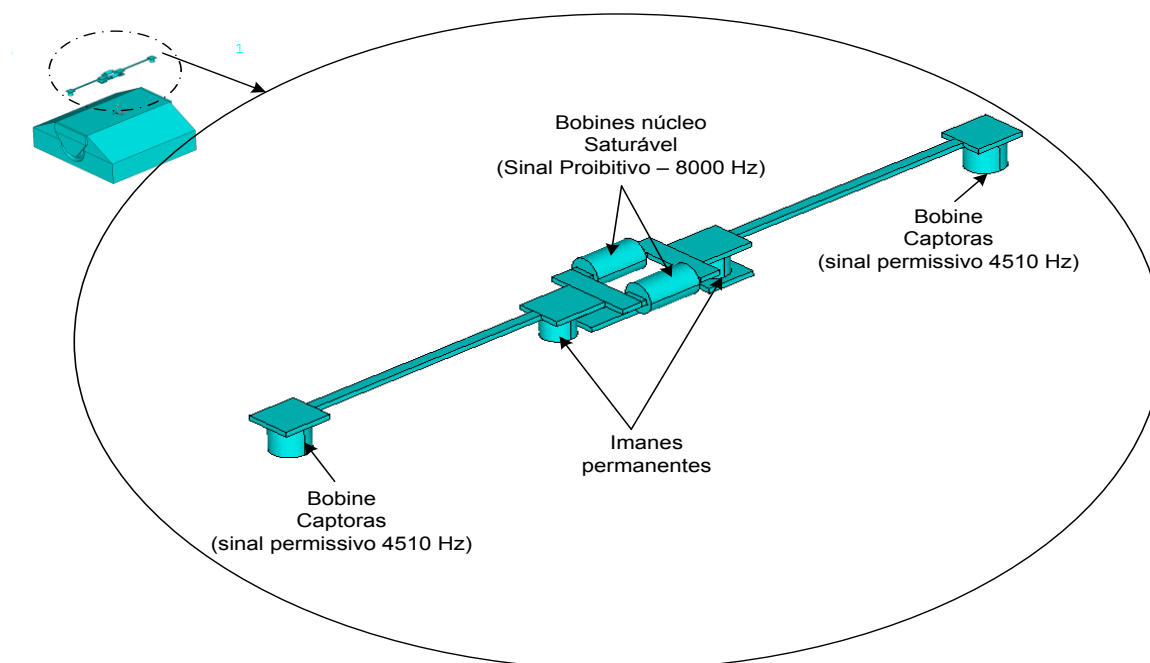


Figura 5.17 – Modelo geométrico do captor

Na modelização do captor foram encontrados desafios acrescidos, consequentes da escassa informação disponível. As duas únicas referências encontradas que apresentaram utilidade na modelização foi um esquema representativo do captor, [27], onde são visualizados os seus componentes constituintes e a sua disposição e um esquema elétrico do circuito oscilador do captor.

Não existindo especificações concretas das dimensões do captor, foram realizados um conjunto de medições a um exemplar, disponibilizado pelo ML, que permitiu uma aproximação razoável entre aquilo que se estava a modelizar e o que existe na realidade. Relativamente aos materiais constituintes, foi assumido o mesmo princípio utilizado na construção da baliza, ou seja, não havendo informação, selecionou-se um material que, não compromettesse a cumprimento das especificações de funcionamento. A introdução do captor no modelo impôs a alteração de alguns pressupostos até então utilizados. Até aqui, a simulação efetuada no Ansys era do tipo Magnetostática. Este tipo de simulação não permite a inclusão de sinais elétricos variantes no tempo. O raciocínio lógico seria a utilização da simulação harmónica do Ansys, mas dado que este tipo de simulação não permitia a interação de ímanes permanentes, com fontes de sinais elétricos variantes do tempo, optou-se por escolher a análise transitória do Ansys. Do ponto de vista do desenvolvimento do código fonte, para a análise transitória, a sequência é similar à descrita pelos exemplos da na análise magnetostática. Todavia, o aumento considerável do número de volumes, e elementos, necessários para a construção do captor, levou a que a dimensão do código fonte tenha crescido consideravelmente, tornado inviável a sua apresentação completa no presente documento. No entanto, é possível consulta-lo no CD em anexo.

Um outro pressuposto alterado teve que ver com o tipo de materiais utilizados anteriormente na baliza. Tanto o material Ticonal, como o FeCo35, utilizado até ao momento, apresentavam uma curva de magnetização não linear, situação que se aproxima mais da realidade. Todavia, a utilização destes materiais não lineares na análise transitória, aumenta significativamente (várias horas) o tempo de cálculo da solução pelo método dos elementos finitos. Verificou-se igualmente que, por vezes, o *Ansys* não convergia no cálculo de uma solução. Decidiu-se então alterar as características magnéticas dos dois materiais, para um comportamento linear, sempre que se utilizou a análise transitória. O único material com característica magnética não linear que se teve de manter na análise transitória foi o utilizado na caracterização do núcleo saturável, das

bobinas percorridas pelo sinal proibitivo. Caso contrário, o efeito de saturação provocado pela influência dos ímanes permanentes da baliza, sobre o captor, não seria possível simular.

Para o sinal elétrico de 8kHz, presentes nas bobinas de núcleo saturável, utilizou-se um circuito elétrico simples, através dos elementos CIRC124 (*Ansys*). Constituído por uma fonte de tensão e resistências de carga, a ligar aos elementos das bobines, o modelo deveria gerar um sinal de 1.5Vpp, somatório das tensões geradas em cada bobine, na condição em que o captor não tinha nenhuma influência da baliza. Esta condição foi conseguida calculando a solução do modelo, tendo atribuído a todos os materiais da baliza a característica do vácuo. A tensão presente nas bobines é evidenciada na Figura 5.18.

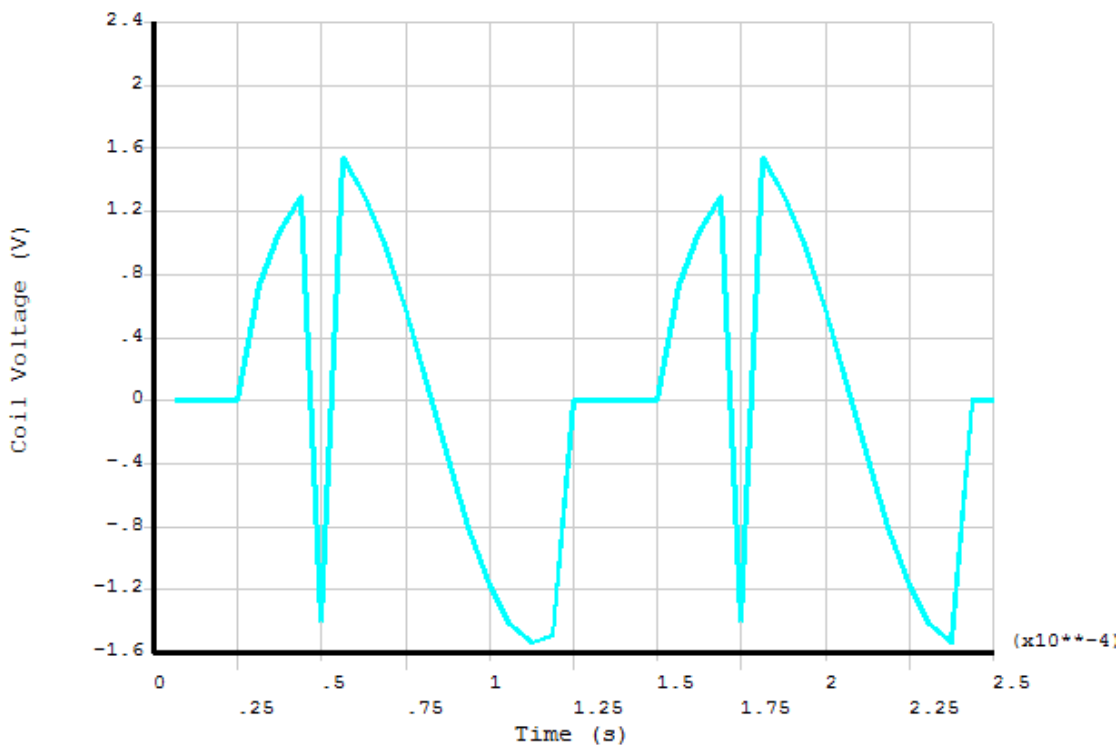


Figura 5.18 – Tensão aos terminais das bobinas captoras, fora da influência da baliza

Tendo garantido a presença de 1,5Vpp nas bobines saturáveis, na condição em que o captor se encontra fora da baliza, prosseguiu-se à simulação do modelo, na condição em que o captor se encontra sobre a influência da baliza.

A Figura 5.19 ilustra um gráfico vetorial de campo magnético produzido da interação magnética existente entre a baliza e o captor. Como se pode verificar, as chapas laterais da baliza, juntamente com os braços do captor, fazem com que as linhas de fluxo sejam direcionadas, criando um circuito de acoplamento magnético.

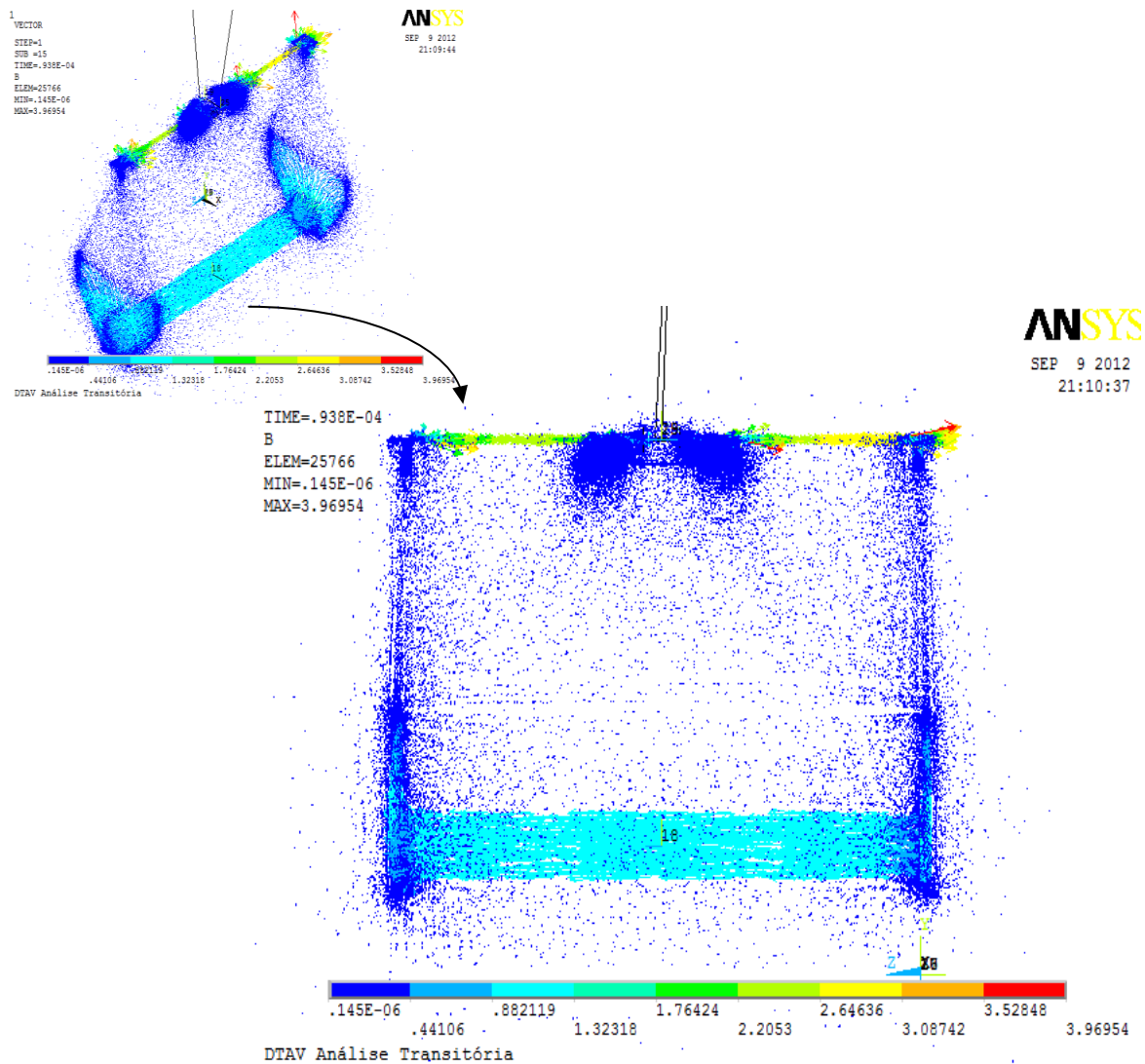


Figura 5.19- Distribuição do campo magnético na interação baliza - captor

O sinal elétrico resultante, aos terminais das bobinas de núcleo saturável, é evidenciado na Figura 5.20. Pode-se constatar claramente que o sinal encontra-se completamente distorcido, comparativamente ao sinal original e com uma amplitude quase nula. Esta

distorção é provocada pela interação dos ímãs permanentes da baliza sobre o núcleo saturável das bobinas do captor.

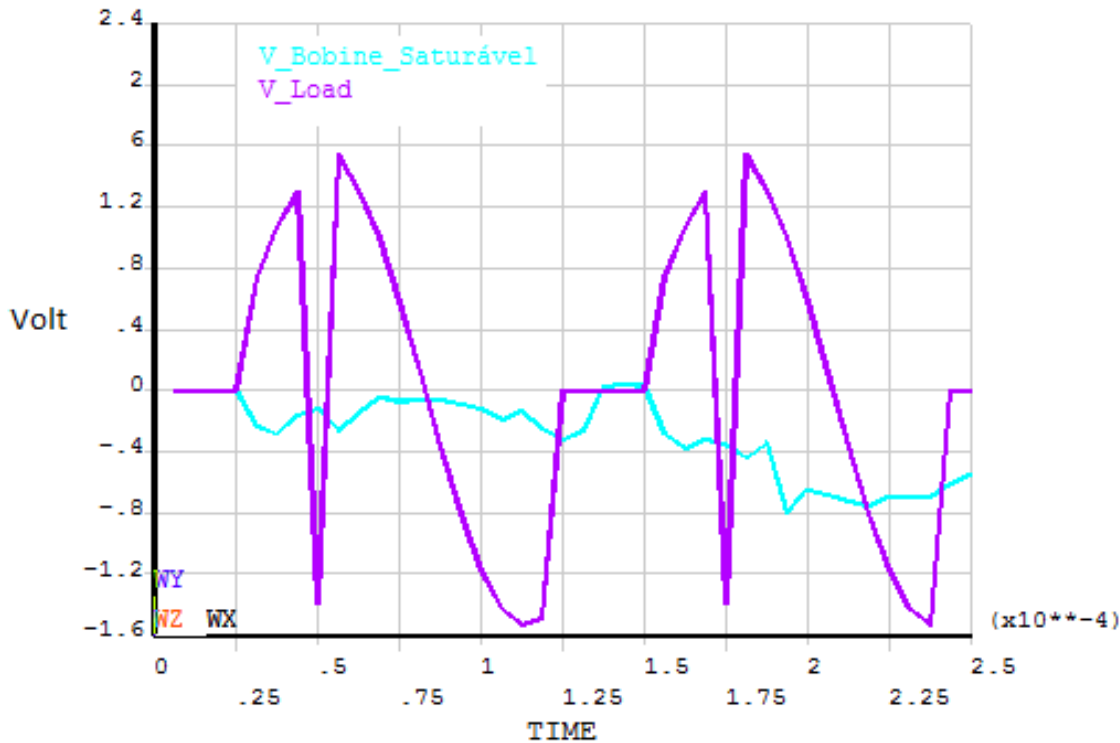


Figura 5.20 - Tensão aos terminais das bobines captoras com influência da baliza - V_Bobine_Saturável e sem influencia da baliza – V_Load

Para validar, na íntegra o modelo na condição proibitiva, de acordo com a especificação [23], deslocou-se o captor 0.2125m do centro da baliza, a uma altura de 0,120m, Figura 5.21. Dada a simetria apresentada pela baliza, este deslocamento seria o necessário para comprovar a influência da baliza num comprimento mínimo de 0,425m, a 0,120m de distância.

Feito o novo cálculo da solução, verificou-se que os resultados corresponderam com as expectativas, ou seja, nas condições simuladas, o sinal presente nas bobinas de núcleo saturável era completamente distorcido e com uma tensão com um valor máximo de 0.2Vpp. É de notar que tanto para esta simulação, como na anterior, em que o captor estava centrado com a baliza, nunca foi possível obter um sinal de 0Vpp. A razão deve-se ao fato de nas condições reais de funcionamento, o sinal de 8kHz presente nas bobinas do captor, ser parte integrante de um circuito eletrónico oscilador com uma potência finita e

que, quando sujeito à influência do campo magnético da baliza, perde por completo a condição de oscilação elétrica. No caso do modelo teórico criado, o sinal gerado para alimentar as bobinas do captor é proveniente de uma fonte de tensão ideal, o que implica sempre uma reação de oposição às variações de fluxo magnético, nas bobinas do circuito elétrico.

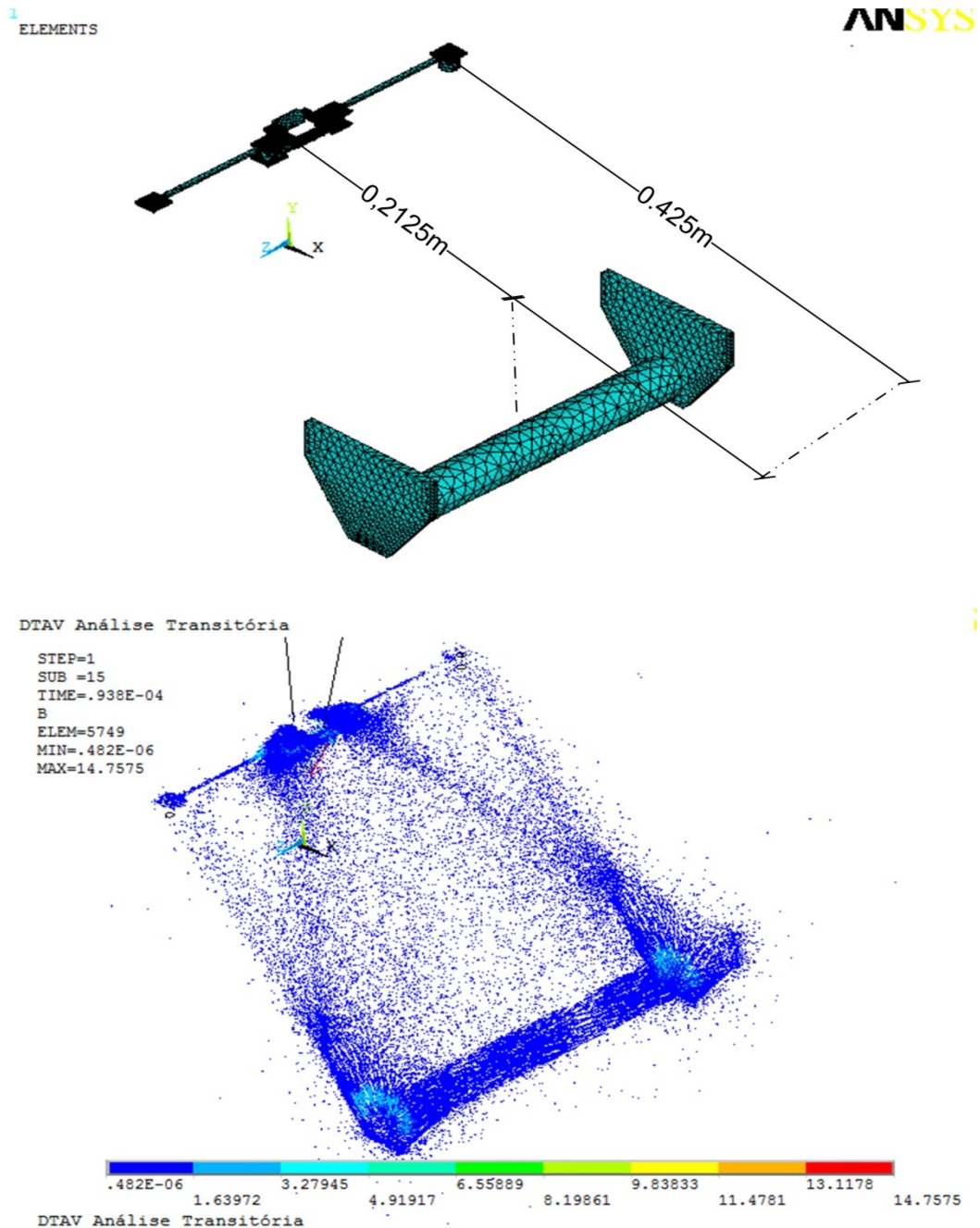


Figura 5.21 – Interação magnética baliza-captor para um deslocamento de 0.2125m.

Para se compreender a razão pela qual existe um decréscimo do sinal das bobinas de núcleo saturável, apresenta-se a Figura 5.22. Quando o captor se encontra fora da influência da baliza, as bobinas em questão só estão sujeitas às linhas de fluxo magnético provenientes dos ímanes do captor. Parte destas linhas de fluxo magnético fluem inclusivamente pelo braço captor, não interferindo no núcleo das bobinas.

Quando a influência da baliza é imposta todas as linhas de fluxo magnético interferem no núcleo das bobinas, fazendo com que haja uma alteração das indutâncias das mesmas, o que acaba por provocar o decréscimo das tensões elétricas nos seus terminais.

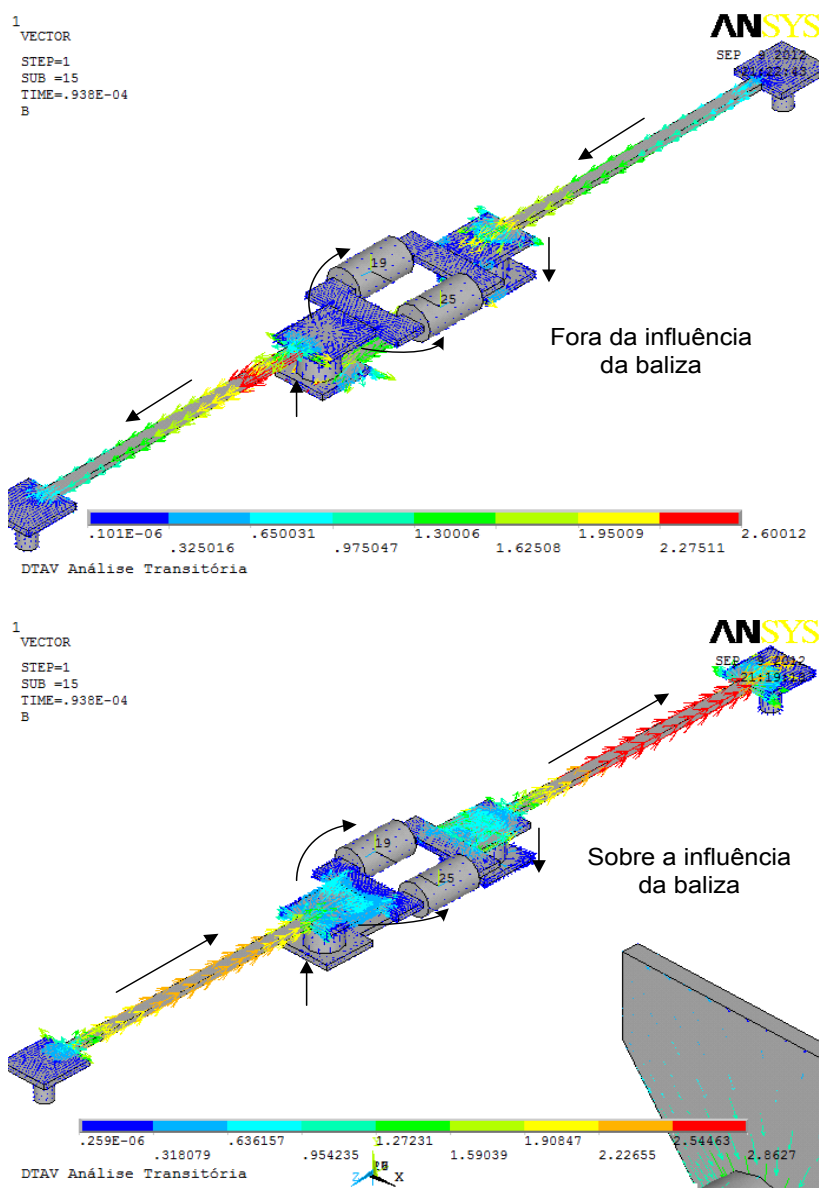


Figura 5.22 – Direção do campo magnético no captor

5.3 Análise da Condição Permissiva do DTAV

Na verificação do funcionamento do DTAV, na condição permissiva, ou seja, na interação baliza-captor, por intermédio de um sinal elétrico de 4510 Hz, houve a necessidade de acrescentar ao modelo 3 bobinas: a bobine na baliza e as duas bobines captoras, Figura 5.23. Nesta fase do trabalho, foram retirados do modelo os elementos referentes aos braços do captor e o circuito magnético das bobinas de núcleo saturável. A razão principal tem que ver com a simplificação do modelo, aleada ao tempo de processamento da solução do MEF, que dessa decisão se reduz.

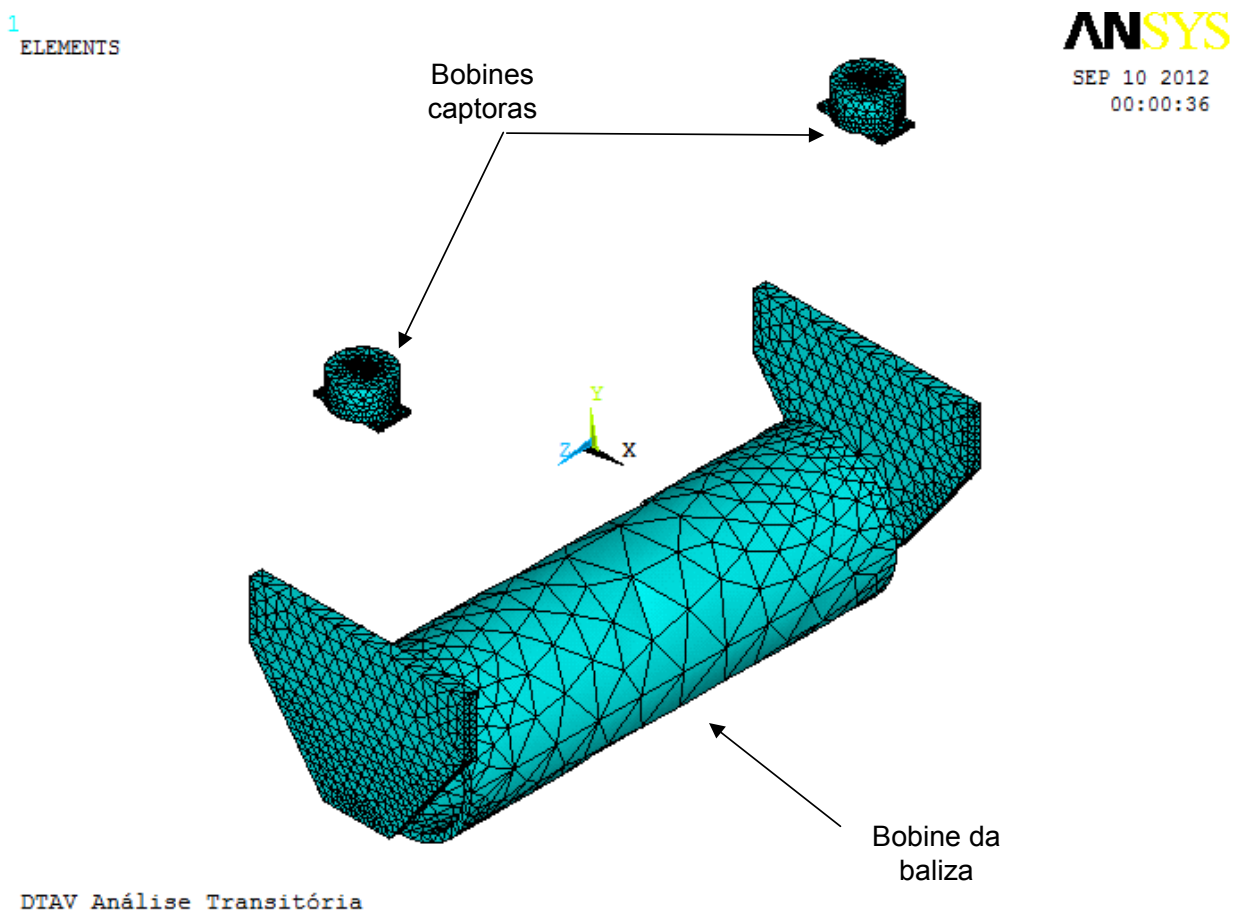


Figura 5.23 – Elementos do modelo utilizados na simulação da condição permissiva

O dimensionamento da bobina da baliza revelou-se uma tarefa simples, na medida em que foi disponibilizada, por parte do ML, um exemplar degradado que já não era utilizado e que permitiu aferir com maior rigor os parâmetros da mesma. Foram registados, os valores de resistência elétrica, indutância, número de espiras e secção. Relativamente às

balizas captoras, a tarefa foi um pouco mais difícil, no entanto, foi possível a medição da resistência elétrica, indutância, para além de uma aferição menos precisa, das suas dimensões geométricas, o que permitiu a determinação do valor aproximado do número de espiras e sua secção. A primeira simulação consistiu na medição da tensão induzida nos terminais das bobinas captoras, quando o captor se encontra centrado com a baliza a 0,120m de distância. Tal como, no ensaio prévio, descrito na secção 5.1., o valor de tensão elétrica obtido na simulação foi de 2Vpp.

O segundo ensaio realizado teve como objetivo a validação do modelo, na influência que o sinal permissivo da baliza tem sobre o captor, num comprimento compreendido entre 0,950 a 1,200 m, a uma distância de 0,120m da baliza, Figura 5.24.

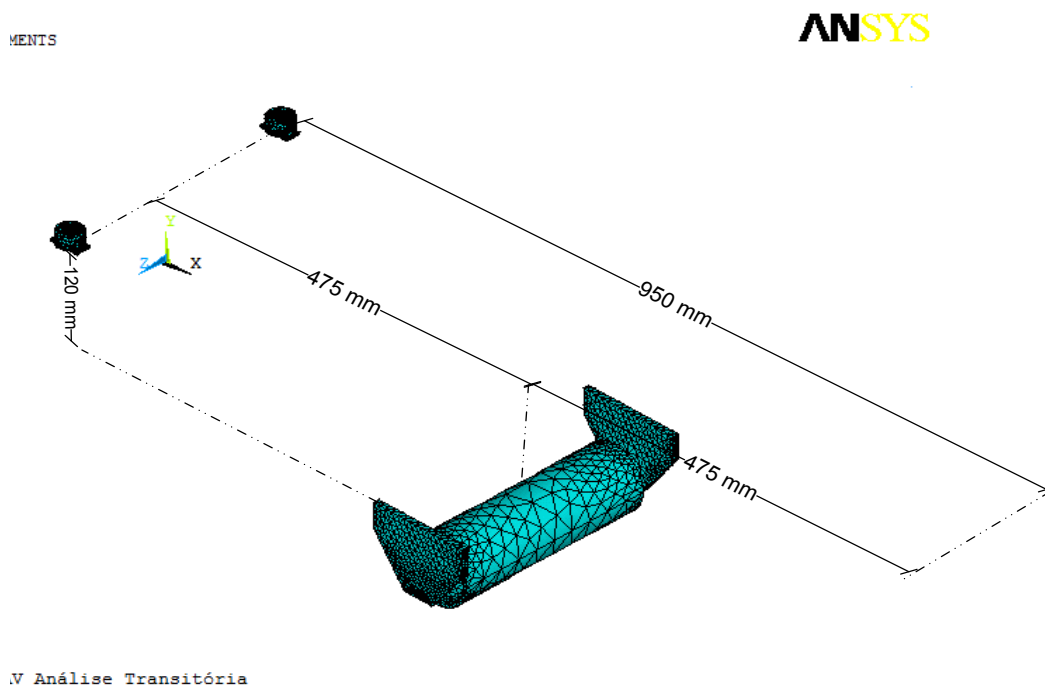


Figura 5.24 – Ensaio das bobinas captoras a 0.475m de distância

Uma vez que o modelo revela simetria, a simulação teve em conta o deslocamento do captor em 475 mm, relativamente ao centro da baliza. A tensão induzida medida aos terminais do captor, Figura 5.25, apresenta um valor de 0,240 Vpp. Apesar de se apresentar abaixo do especificado, não deixa de ter validade, uma vez que o erro é aceitável (4%). Dadas as dimensões que o modelo passou a ter e o conseqüente aumento do número de elementos finitos, o tempo de processamento aumentou substancialmente.

As limitações na capacidade de processamento do computador utilizado, face ao número de soluções a calcular, impediu a simulação do captor a uma distância de 600 mm, o que validaria por completo a zona de influência permissiva (0,950m – 1,200m) da baliza, relativamente ao captor.

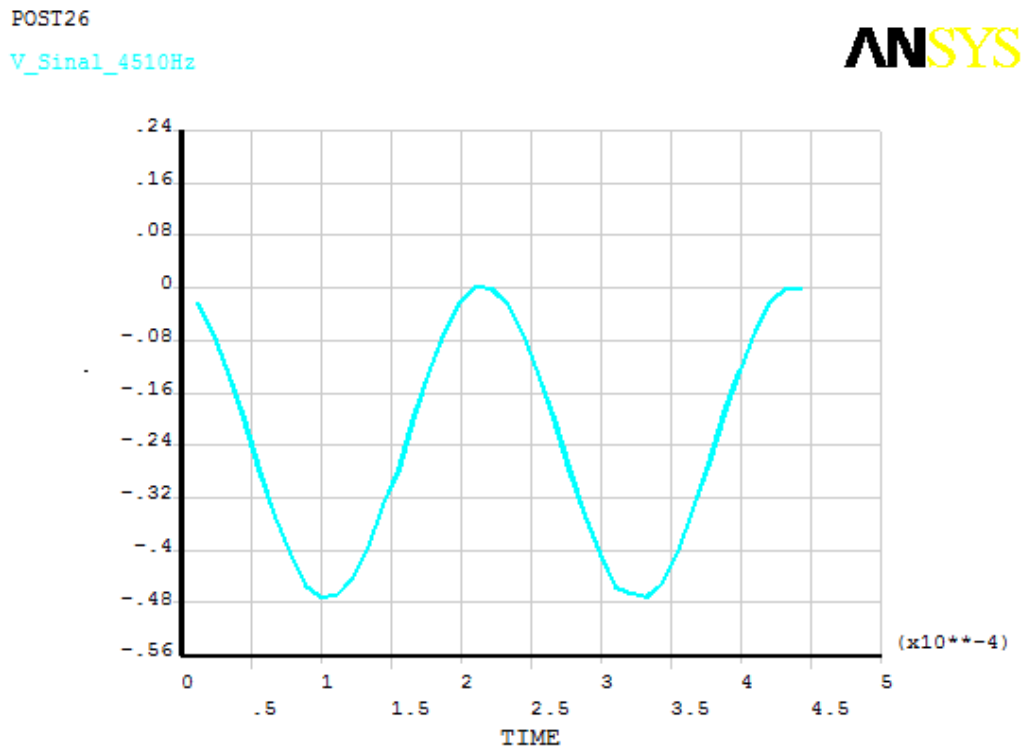


Figura 5.25 – Tensão induzida nos terminais das bobinas captoras – captor deslocado 0.475m

5.4 Conclusão

Tendo por base as especificações do fabricante [23], evidenciadas na secção 5.1, e dos ensaios prévios realizados, descritos em 5.1.1, pode-se concluir que o modelo em elementos finitos desenvolvido, permite a simulação, de forma satisfatória, do sistema DTAV. Numa fase posterior à construção do modelo, foram realizados dois ensaios experimentais, que serviram para consolidar a validade do modelo.

O primeiro ensaio, que consistiu na medição de uma série valores de campo magnético, em diferentes posições e a diferentes distâncias de uma baliza, permitiu confirmar a distribuição espacial do campo magnético, obtidos no modelo desenvolvido. O segundo

ensaio, realizado com um comboio a circular à velocidade máxima permitida no ML, permitiu concluir que as especificações do fabricante [23], apresentam tolerâncias de funcionamento nunca inferiores a 30%, para uma velocidade máxima de 16,7 m/s (60 km/h).

Todas as especificações funcionais foram validadas. Todavia, é plausível aceitar que, com melhor conhecimento do tipo de materiais constituintes do captor, nomeadamente as suas características de comportamento magnético e parâmetros de construção das bobinas envolvidas, o modelo será capaz de simular o DTAV de forma mais rigorosa.

CAPÍTULO 6

CONCLUSÕES

Resumo

O presente capítulo pretende evidenciar as conclusões obtidas com a modelização do sistema DTAV, enquadrando-as nos objetivos propostos e em futuros desenvolvimentos.

6 CONCLUSÕES

6.1 Considerações finais

Neste trabalho foi apresentada uma descrição da evolução histórica dos sistemas de proteção automáticos de comboios, desde os seus primórdios, no início do séc. XVIII, até à atualidade.

Procurou-se evidenciar os diferentes tipos de sistemas de proteção existentes, nomeadamente ao conjunto de funcionalidades que dispõem (sinalização de cabine, supervisão e intervenção), aos princípios físicos de transmissão (Mecânica, galvânica, Indutiva, etc...) e aos níveis de automatização que podem oferecer (ATO, Driverless, Unattended). Adicionalmente procurou-se evidenciar o aparecimento de especificações e normas ferroviárias que tentam responder à crescente necessidade de interoperabilidade (e.g. ERTMS) e segurança (e.g. EN50126), neste tipo de sistemas.

Tendo contextualizado o âmbito dos sistemas de proteção automática de comboios, procedeu-se à descrição do funcionamento do sistema DTAV, nomeadamente o seu princípio físico de transmissão de informação via-bordo, bem como os equipamentos de que é constituído. Atendendo à sua funcionalidade, o DTAV poderá ser classificado como um *Train –Stop*. Em relação ao seu princípio físico de transmissão, o referido sistema é do tipo indutivo.

O DTAV, tal como um grande número de sistemas de proteção automática de comboios, instalados em todo o mundo, apresenta uma longevidade de serviço muito elevada, superior a 30 anos. A arquitetura do sistema DTAV e os princípios de funcionamento nos quais este sistema se sustenta, aliado ao tempo de serviço sem registo de falhas de segurança, comprovam a elevada fiabilidade e disponibilidade do mesmo, apesar de não se encontrar certificado com as mais recentes normas de segurança ferroviária.

Foi realizada uma breve apresentação ao método dos elementos finitos. Apesar de ser uma ferramenta já muito utilizada em variadas áreas de conhecimento, o seu recurso deve ser previamente ponderado, nomeadamente através de uma estimativa do tempo

despendido na modelização e a sua confrontação com as mais-valias que o modelo poderá trazer.

No que respeita aos sistemas de proteção automática de comboios, a utilização do MEF apresenta-se como uma opção válida a ser tida em consideração, justificada pelas funcionalidades de segurança que estes sistemas de proteção cumprem. A utilização desta ferramenta não fica restrita somente ao desenvolvimento de novos sistemas, podendo ser utilizada na simulação de sistemas já existentes, como é o caso do DTAV.

Para que a utilização dos softwares de MEF, em projetos de engenharia, gere resultados congruentes, é necessário o conhecimento prévio dos princípios físicos subjacentes ao sistema a ser modelizado, como também a forma como cada software lida com os mesmos. Por este motivo, foi apresentada a base científica, em que o *software Ansys* se sustenta, nomeadamente as equações físicas do eletromagnetismo e as formulações matemáticas, disponibilizadas pelo software, para o cálculo de soluções.

Procedeu-se à modelização, do princípio físico de funcionamento do DTAV, associado à interação magnética Baliza-captor.

Numa primeira fase foram calculados e validados os valores de campo magnético, às distâncias especificadas por [23] e descritas na secção 5. Para além das referidas especificações, os resultados do modelo foram ainda confrontados com as medições de campo magnético, efetuadas em balizas de DTAV, num ensaio realizado posteriormente. A comparação dos resultados revelou um erro médio de 10%.

A modelização tridimensional do sistema DTAV proporcionou uma nova perceção da zona de influência da baliza, fato que até à data não era conhecido de uma forma tão precisa.

Da conjugação dos resultados do modelo criado, com os do ensaio dinâmico realizado, foi permitido aferir que o valor de referência de campo magnético (0,0013T) e a sua janela de medição mínima (0,305m), especificados em [23], apresentam uma tolerância mínima de funcionamento de 30%, para uma velocidade máxima de circulação de 16,7 m/s (60 km/h).

Procedeu-se igualmente à simulação do funcionamento do DTAV nas condições em que o captor se encontra fora da zona de influência da baliza e, posteriormente, na condição

em que o captor se encontra sobre a influência da baliza. Por uma questão de simplificação e redução do tempo de cálculo da solução do modelo, a análise do sinal proibitivo do captor (8kHz), foi realizada separadamente da análise da condição permissiva (4510Hz).

No caso da simulação da condição proibitiva, constatou-se que o erro do modelo foi de 12,5%, atendendo ao fato de não ter sido possível que o sinal presente nas bobinas de núcleo saturável caísse para 0Vpp, quando sobre o efeito do campo magnético da baliza. A redução do erro para valores abaixo dos 10% só seria possível através do conhecimento mais pormenorizado dos materiais constituintes do captor.

Relativamente à simulação da condição permissiva, os resultados foram bastante satisfatórios, apresentando um erro de 4% relativamente ao especificado em [23]. É de notar que este erro refere-se à condição em que o captor se encontra a 0,475m desfasado do centro da baliza, ou seja, a janela de influência é de 0.950m. Apesar de não ter sido possível simular a influência da baliza sobre o captor, para o desfasamento máximo de 1,2 m, devido limitações de capacidade de processamento do computador utilizado, é razoável afirmar que o erro seria superior a 4%, uma vez que quanto maior for a malha de elementos finitos do modelo, menor terá que ser o seu refinamento, sob pena do computador não ter memória suficiente para calcular a solução.

Com a realização deste trabalho e consequente constatação das potencialidades que os softwares de MEF dispõem atualmente, nomeadamente na análise eletromagnética de sistemas, foi possível evidenciar a importância que o MEF pode ter na área dos sistemas de proteção automática de comboios, não só no desenvolvimento de novos sistemas, como também, na análise de sensibilidade de funcionamento de sistemas já existentes.

6.2 Perspetivas de desenvolvimento futuro

Na sequência deste trabalho, são inúmeras as perspetivas de desenvolvimento futuro que se apresentam.

No âmbito da utilização do sistema DTAV nas instalações do ML, o modelo criado poderá auxiliar a compreensão do efeito das correntes de tração elétrica dos comboios podem ter, no sistema DTAV, quer em eventuais travagens intempestivas, fruto dos

campos magnéticos produzidos nas imediações dos cabos de retorno de corrente, quer nos eventuais efeitos de desmagnetização dos ímanes permanentes das balizas.

Adicionalmente poderá ser simulado o funcionamento dinâmico do sistema DTAV, ou seja, a simulação do captor em movimento e a conseqüente interação com a baliza instalada no solo, permitindo averiguar, de forma mais precisa quais os limites de funcionamento do sistema.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] KICHENSIDE, GEOFFREY - Two Centuries of Railway Signalling, 1997
- [2] ROLT, L.T.C - The Classic History of British Railways Disasters
- [3] THEEG, GREGOR, VLASENKO, SERGEI - Railway Signalling & Interlocking International Compendium – 2009, Eurail Press, ISBN 978-3-7771-0394-5
- [4] Le crocodile, www.Wikipédia.com
- [5] Railway Signalling, Institution of Railway Signal Engineers, 1980, A&C Black (Publishers), ISBN 0-7136-2724-7
- [6] Slides de apresentação do sistema ASFA, Dimetronic Signals, 2009
- [7] RÉTIVEAU, ROGER - La Signalisation Ferroviaire, 1987, Press de l'école nationale des Ponts et Chaussées, ISBN 2-85978-102-1
- [8] Norma Portuguesa NP EN 50126, 2000, Aplicações Ferroviárias – Especificação e demonstração de Fiabilidade, Disponibilidade, Manutibilidade e Segurança (RAMS)
- [9] European Standard EN50129, April 2000, Railway applications – Safety related electronic systems for signalling
- [10] LEVEQUE, OLIVIER, - ETCS implementation Handbook, UIC – International Union of Railways, ISBN:2-7461-1499-2, Paris, 2008
- [11] LOPES, LUIS AREGA - Relatório final UGTMS 2004 e apresentação, Metropolitano de Lisboa E.P.
- [12] Relatório MODURBAN - Annex 1 - Description of the Work
- [13] Instruções de Conservação do DTAV Indutivo, Equipamento de via, Metropolitano de Lisboa, DET, 1976.
- [14] Regulamento de circulação de Comboios, Metropolitano de Lisboa, Abril de 2003
- [15] MELLO, Francisco de Mercês – Elementos Finitos Formulação Residual de Galerkin, 1ª edição, Edições Sílabo, Lisboa, 2010,ISBN 978-972-618-590-1
- [16] DIAS, F. Teixeira – Método dos Elementos Finitos Técnicas de simulação numérica em Engenharia, ETEP – Edições Técnicas Profissionais, Lisboa, 2010, ISBN: 978-972-8480-25-7

- [17] Ansys Mechanical APDL and Mechanical Applications Theory Reference, Release 13.0, 2010
- [18] M.GYIMESI, D. LAVERS, T. PAWLAK – “Application of the General Potential Formula in the ANSYS Program”. IEEE Transactions on Magnetics. Vol 29. pp.1345-1347,1993
- [19] M.GYIMESI, D. LAVERS, - “Generalized Potential Formulation for 3-D Magnetoestatics”, IEEE Transactions on Magnetics. Vol 28. Nº 4, 1992.
- [20] BIRO, OSZKAR, PREIS, KURT, - “On the Use of the Magnetic Vector Potential in the Finite Element Analysis of Three- Dimensional Eddy Currents”, IEEE Transactions on Magnetics. Vol 25. Nº 4, pp. 3145-3159, 1989.
- [21] HAMEYER, K, BELMANS, R, “Numerical Modelling and Design of Electrical Machines and Devices”, WitPress, Southampton, Boston, 1999, ISBN: 1 85312 626 8
- [22] Ansys Element Reference, Release 12.0, 2009
- [23] Balise Lisbonne R02274/001, Cahier de Recette, Barraud, SILEC, 1992
- [24] DTAV Indutivo/MC- ML79, Captor Esquema, Desenho nº 24590, Metropolitano de Lisboa, 1984
- [25] BUSCHOW, K.H.J, - Physics of Magnetism and Magnetic Materials, Kluwer Academic Publishers, pp 108, New York, 2004, ISBN: 0-306-48408-0
- [26] Catálogo SOPIMED, Permanent Magnets nº 3, (<http://www.sopimed.com>)
- [27] Capteur Magnelec 2337 Lisbonne, Ensemble Circuit Magnétique, SILEC R02337, 1983

ANEXO

CÓDIGO FONTE

Resumo

É apresentado, a título exemplificativo, o código fonte do modelo da análise magnetostática, na linguagem APDL do Ansys. As linhas de programação são acompanhadas de comentários explicativos. Este código refere-se à simulação do campo magnético da baliza, utilizando uma sonda.

K,13,140,40,-6
K,14,140,40,0
K,15,177, 40,0
K,16,177, 40,-6

K,17,98, 98,-6
K,18,98, 98,0
K,19,219,98,0
K,20,219,98,-6

K,21,98, 130,-6
K,22,98, 130,0
K,23,219,130,0
K,24,219,130,-6

!Criação dos volumes da carcaça da baliza

V,1,2,3,4,5,6,7,8!CRIAÇÃO DO VOLUME
NV1=1 !Identificação do volume
V,5,6,7,8,9,10,11,12 !Criação do Volume
NV2=2 !Variável de identificação do volume

!ADIÇÃO DAS DUAS PARTES

VADD,NV1,NV2
VDELE, NV1, NV2, 1, 1

NV3=3 !ID da carcaça da baliza
NUMSTR, VOLU, 3 !Mantem a sequência crescente na criação de ID dos volumes

!Cilindro interior do volume
CYL4, 158.5,63.5,46.5,0,0,360,291 !Criação de volume cilíndrico
NV4=4 !Variável de identificação do volume

!SUBTRAÇÃO DOS VOLUMES

VSBV,3,4,,DELETE,DELETE

NV5=5 !NOVO ID do volume

NUMSTR, VOLU, 5

!Criação dos ímanes

CYL4, 158.5,63.5,18.25,0,0,360,50 !Criação do volume cilindrico

NV6=6 !Variável de identificação do volume

VGEN, 2, NV6, NV6, 1, 0, 0, 7, 0, 0, 0 !VGEN, ITIME, NV1, NV2, NINC, DX,
DY, DZ, KINC, NOELEM, IMOVE

NV7=7

VDELE, NV6, NV6, 1, 1

NUMSTR, VOLU, 7 !ID dos volumes não se sobrepõe aos já utilizados

VGEN, 2, NV7, NV7, 1, 0, 0, 112, 0, 0, 0 ,

NV8=8 .

VGEN, 2, NV7, NV7, 1, 0, 0, 224, 0, 0, 0

NV9=9

!Definição dos Keypoints dos cilindros ferromagnéticos

CYL4, 158.5,63.5,18.25,0,0,360,62 !CRIAÇÃO DE VOLUME CILINDRICO

NV10=10 !Variável de identificação do volume

VGEN, 2, NV10, NV10, 1, 0, 0, 7, 0, 0, 0

NV11=11

VDELE, NV10, NV10, 1, 1

NUMSTR, VOLU, 11 !ID dos volumes não se sobrepõe aos já utilizados

VGEN, 2, NV11, NV11, 1, 0, 0, 50, 0, 0, 0 ,

NV12=12 .

VGEN, 2, NV11, NV11, 1, 0, 0, 162, 0, 0, 0

NV13=13

VDELE, NV11, NV11, 1, 1

NUMSTR, VOLU, 13

!Criação das chapas laterais da baliza

V,13,14,15,16,17,18,19,20 !Criação do volume

NV14=14 !Identificação do volume

V,17,18,19,20,21,22,23,24 !Criação do volume

NV15=15

!ADIÇÃO DAS DUAS PARTES

VADD,NV14,NV15

NV16=16 !ID da 1ª chapa lateral

VDELE, NV14, NV15, 1, 1

NUMSTR, VOLU, 16

!Criação da segunda chapa lateral

VGEN, 2, NV16, NV16, 1, 0, 0, 296, 0, 0, 0

NV17=17

VSBV,5,16,DELETE,keep

VSBV,18,17,,DELETE,keep

NV19 =19 !novo ID da carcaça

NUMSTR, VOLU, 19

!Criação da superfície de ar para a medição do campo magnético

BLOCK, 6, 311, 250, 400, 144,145!290!145

NV20=20

!Criação da esfera em cuja superfície o campo magnético é nulo

SPH4, 158.5, 0, 580, 0

NV21=21

VGEN, 2, NV21, NV21, 1, 0, 0, 145, 0, 0, 0!VGEN, ITIME, NV1, NV2, NINC, DX,
DY, DZ, KINC, NOELEM, IMOVE

NV22=22

VDELE, NV21, NV21, 1, 1

VDELE, 5, 5, 1, 1

NUMSTR, VOLU, 22

ALLSEL

VSEL,S,VOLU,,ALL

VOVLAP,ALL !Overlap dos sólidos criados Ex: ao volume de ar !definido pela
esfera terá de ser subtraído todos os !volumes que compõem
a baliza

!Definição dos nomes mais apelativos para os volumes criados

MIOLO=27

IMAN12=7

IMAN34=8

IMAN56=9

FERRO1=23

FERRO2=24

CHAPA1=25

CHAPA2=26

SONDA=20

ESFERA=28

!Definição dos elementos

ET,1,SOLID237

KEYOP,1,7,1 !Graus de liberdade AZ do elemneto (variável !potencial !magnético
escalar)

!Definição dos materiais

pi=acos(-1) !Definição da constante pi

mu0=4*pi*1e-7 !Permeabilidade magnética do vácuo

mu0r=1 !Permeabilidade magnética relativa

!Definição do material da esfera

MP,MURX,1,mu0r !Permeabilidade magnética do vácuo na direção x

MP,MURY,1,mu0r !Permeabilidade magnética do vácuo na direção y

MP,MURZ,1,mu0r !Permeabilidade magnética do vácuo na direção z

!Definição do material da sonda

MP,MURX,2,mu0r !Permeabilidade magnética do vácuo na direção x

MP,MURY,2,mu0r !Permeabilidade magnética do vácuo na direção y

MP,MURZ,2,mu0r !Permeabilidade magnética do vácuo na direção z

!Definição do ar

MP,MURX,3,mu0r !Permeabilidade magnética do vácuo na direção x

MP,MURY,3,mu0r !Permeabilidade magnética do vácuo na direção y

MP,MURZ,3,mu0r !Permeabilidade magnética do vácuo na direção z

!Definição da propriedade do material do iman permanente

!Força Coerciva

MP,MGXX,4,0

mp,MGYX,4,0

mp,MGZZ,4,51725

HC=51725 !Força coerciva

BR=1.205 !Indução magnetica residual

!BH curve

TB,BH,4

TBPT,DEFI,-51725+HC,0

TBPT, ,-49338+HC,0.150

TBPT, ,-47746+HC,0.3

TBPT, ,-46980+HC,0.45

TBPT, ,-44762+HC,0.75

TBPT, ,-42275+HC,0.9

TBPT, ,-39166+HC,1.05

TBPT, ,-19894+HC,1.2

TBPT, ,0+HC,1.250

!TBPLOT, BH,4 !PLOT BH CURVE

!Definição do material ferromagnético macio FeC035

MP,MURX,5,0

MP,MURY,5,0

MP,MURZ,5,0

!BH curve

TB,BH,5 !curva BH (Ferro Cobalto 35%)

TBPT,DEFI,0,0

TBPT, ,118.1,250

TBPT, ,152.8,400

TBPT, ,236.2,700

TBPT, ,314.9,960

TBPT, ,393.7,1150

TBPT, ,787.4,1520

TBPT, ,1575,1820

TBPT, ,2362,1940

TBPT, ,3150,2040

TBPT, ,3937,2130

TBPT, ,7874,2370

TBPT, ,15748,2620

TBPT, ,31496,2860

TBPT, ,62992,3110

TBPT, ,125984,3333

TBPT, ,251968,3500

TBPT, ,503936,3806

!Atribuição dos materiais aos volumes

VSEL,S,VOLU,,MIOLO

VATT,3,1,1

VSEL,S,VOLU,,IMAN12

VATT,4,1,1

VSEL,S,VOLU,,IMAN34
 VATT,4,1,1
 VSEL,S,VOLU,,IMAN56
 VATT,4,1,1
 VSEL,S,VOLU,,FERRO1
 VATT,5,1,1
 VSEL,S,VOLU,,FERRO2
 VATT,5,1,1
 VSEL,S,VOLU,,CHAPA1
 VATT,5,1,1
 VSEL,S,VOLU,,CHAPA2
 VATT,5,1,1
 VSEL,S,VOLU,,SONDA
 VATT,2,1,1
 vsel,s,volu,,ESFERA
 VATT,1,1,1

!Criação da Malha de elementos finitos do modelo

!Por conveniência, criam-se as malhas individualmente

!pois pode ser necessário simular algo sem um determinado componente

!tornando-se mais fácil se as malhas forem criadas individualmente

allsel

DESIZE

Esize,0,10

VMESH, MIOLO, MIOLO, 1 !Cria Malha para o miolo

Esize,0,20

VMESH, IMAN12, IMAN12, 1 ! Cria Malha para os imanes

VMESH, IMAN34, IMAN34, 1 ! Cria Malha para os imanes

VMESH, IMAN56, IMAN56, 1 ! Cria Malha para os imanes

VMESH, FERRO1, FERRO2, 1 ! Cria Malha para os ferros

VMESH, CHAPA1, CHAPA2, 1 ! Cria Malha para as chapas laterais

!Refinamento da malha

Esize,0,20

VMESH, SONDA, SONDA, 1 ! Cria Malha para a sonda

DESIZE

VMESH, ESFERA, ESFERA, 1 ! Cria Malha para a esfera

allsel

!Condições de fronteira

nset,s,ext

d,all,az,0 !Condição "Magnetic Flux parallel"

!Fora da esfera o campo é nulo

allsel

FINI

!Fase de cálculo da solução

/SOLU

SOLVE

allsel

FINI

!Fase de Pós-Processamento

!Agrupamento de elementos para possibilitar uma melhor visualização dos resultados

/POST1

ESEL,,MAT,,1 !

CM,ESFERA,ELEM !

ESEL,,MAT,,2 !

CM,SONDA,ELEM !

ESEL,,MAT,,3 !

CM,MIOLO,ELEM !

ESEL,,MAT,,4 !

CM,IMANES,ELEM !

ESEL,,MAT,,5 !

CM,FERRO,ELEM !

CMGRP,BALIZA, MIOLO,IMANES,FERRO

FINI !Fim de modelo