



**UNIVERSIDADE DE
COIMBRA**

**FACULDADE
DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA**

**DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA**

Projeto de automatização da produção de artigo pirotécnico de classe F1

Dissertação apresentada para a obtenção do grau de Mestre em Engenharia Mecânica na Especialidade de Energia e Ambiente

Automation project of the production of F1 class pyrothetic articles

Autor

Luis Gonçalo Lucas dos Santos da Cruz Simões

Orientadores

Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes

Professor Doutor Pedro Mariano Simões Neto

Júri

Presidente Professor Doutor José Luis Ferreira Afonso
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Vogal Professor Doutor José Carlos Miranda Góis
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Orientador Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Novembro, 2018

“Eu não creio que exista algo mais emocionante para o coração humano do que a emoção sentida pelo inventor quando ele vê alguma criação da mente se tornando algo de sucesso. Essas emoções fazem o homem esquecer comida, sono, amigos, amor, tudo.”

— Nikola Tesla

Aos meus pais

AGRADECIMENTOS

Não é possível escrever dentro desta secção os agradecimentos devidos a todos aqueles que, ao longo do meu Mestrado Integrado de Engenharia Mecânica me ajudaram e apoiaram, direta ou indiretamente, a concretizar esta etapa da minha formação académica. Apenas posso deixar algumas palavras às pessoas que me ajudaram nesta fase final do curso, e marcante para a vida.

Ao Coordenador do Mestrado Integrado de Engenharia Mecânica, o Professor Doutor António Manuel Mendes Raimundo, agradeço a oportunidade e o privilégio que tive em frequentar este Mestrado, que em muito contribuiu para o enriquecimento da minha formação académica e científica.

Ao Professor Doutor Ricardo Mendes, meu orientador, agradeço pela disponibilidade, orientação, motivação e apoio que sempre manifestou, fornecendo todas as oportunidades possíveis para boa conclusão da tese.

Ao Professor Doutor Pedro Neto, meu co-orientador, agradeço o discernimento e apoio que demonstrou sempre que as escolhas a fazer no decurso do trabalho me pareciam incertas.

Ao David Rodrigues, agradeço a disponibilidade que me demonstrou para partilhar a sua experiência com máquinas e fabrico de peças, conhecimento que me foi e será muito útil.

Ao Nuno Almeida, agradeço ter facilitado os contactos necessários ao longo da elaboração deste trabalho, mesmo para períodos de tempo inconvenientes.

À minha família, em especial aos meus Pais, um obrigado por acreditarem em mim e sempre olharem para o meu bem. Desejo que esta etapa, que agora termino, possa, de alguma forma, retribuir todo o apoio, carinho e dedicação que, constantemente, me oferecem. A eles, dedico todo este trabalho.

A estes, e muitos outros por mencionar, um grande **Obrigado**

RESUMO

A presente dissertação tem como objetivo a elaboração de um mecanismo que permita produzir estalinhos, artigos pirotécnicos de classe F1, de forma totalmente automática tendo como base um método de produção completamente manual. A classificação dos artigos pirotécnicos tem por base a diretiva europeia referente a comercialização livre de artigos pirotécnicos dentro da união, sendo pretendido que o produto final possua marcação CE válida que permita a sua exportação.

São abordados os requisitos legais de qualidade que são exigidos a um artigo pirotécnico de classe F1, nomeadamente as características físicas do produto, a documentação necessária para obter um certificado CE e o método de avaliação de conformidade aplicável. É igualmente analisada a legislação em relação aos sistemas de segurança e ao controlo dos riscos de operação relevantes para o mecanismo alvo desta tese.

A elaboração do mecanismo vai ser realizada através de modelação 3D recorrendo ao programa SOLIDWORKS, sendo estudada a cinemática, os esforços aplicados nos componentes críticos e o sistema de controlo a fim de ser estimada a viabilidade, a durabilidade e a produtividade do mecanismo. É também considerada uma versão simplificada do mecanismo com funcionamento semiautomático, que requer intervenção direta de um trabalhador.

Os valores estimados para os dois mecanismos são então utilizados para uma análise económica comparativa entre soluções de produção existentes no mercado, com o fim de avaliar se a realização física dos mecanismos propostos é rentável economicamente.

Palavras-chave: Automação, Artigos de pirotecnia, Normas Harmonizadas, Modelação 3D, Produção pequena escala

ABSTRACT

This dissertation aims at the elaboration of a mechanism that allows for the production of F1 class pyrotechnic articles, commonly called throw downs or bang-snaps, through a completely automated method, using a purely manual production process as a basis. The classification of pyrotechnic articles is based on the European directive that regulates the free trade of explosive devices within the EU, with the final product being intended to have a valid CE marking that allows its export.

The legal quality requirements demanded of an F1 class pyrotechnic will be tackled, specifically the physical characteristics of the product, the necessary documentation to obtain a CE certificate and the suitable method for conformance evaluation. The legislation referring the control of operational hazards as well as the safety systems relevant to the mechanism object of this thesis is also analyzed.

The elaboration of the mechanism will be accomplished through 3D modelling by employing SOLIDWORKS software. The kinematics, the stresses on critical components and control system logic are studied with the aim of estimating feasibility, durability and productivity of the mechanism. A semi-automatic, simplified version of the mechanism that requires the direct intervention of a laborer is also considered.

The estimated performance values for both mechanisms are then used for a comparative economic analysis with existing market production solutions, with the goal of determining if the physical construction of both mechanisms is profitable.

Keywords Automation, Pyrotechnic products, Harmonized standards, 3D Modelling, Small scale Production

Índice

Agradecimentos	v
Resumo	vii
Abstract.....	viii
Índice de Figuras	xi
Índice de Tabelas	xii
Siglas	xiii
1. Introdução.....	1
1.1. Importância do tema	1
1.2. Objectivos	2
1.3. Organização da tese	3
2. Produção de estalinhos	4
2.1. Matérias primas.....	4
2.2. Legislação e normas aplicáveis.....	5
2.3. Método de fabrico actual	7
3. Bases para automação.....	9
3.1. Sistemas de automação industrial	9
3.1.1 Actuadores eléctricos.....	10
3.1.2 Sensores	12
3.1.3 Controlo	14
3.2. Esquema automático	15
3.3. Esquema semi-automático	18
4. Legislação.....	20
4.1. Legislação EU para o fabrico.....	21
4.2. Deficiências de concepção a evitar	23
4.3. Procedimentos de Segurança	24
4.4. Protecção adoptada	25
5. Proposta de automação	27
5.1. Decomposição do processo manual	27
5.2. Características do mecanismo.....	30
5.3. Linha de montagem	32
5.4. Sistema de admissão de papel.....	34
5.5. Prensagem	36
5.6. Injecção de material	37
5.7. Enrolamento de estalinho.....	40
5.8. Empacotamento	44
6. Análise económica.....	47
6.1. Descrição máquina pré existente	47
6.1.1. Custos e produtividade	47
6.2. Comparação das diferentes soluções	48
7. Conclusões.....	50

7.1. Trabalho realizado	50
7.2. Trabalho futuro	51
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
ANEXO A – Propriedades fulminato prata	54
ANEXO B – Tabelas grafcet	57
ANEXO C – Gráfico Renold.....	61
APÊNDICE A – Vista expandida prensa	63
APÊNDICE B – Detalhes técnicos injectores	64
APÊNDICE C – Mecanismo deslizante garra.....	65
APÊNDICE D – Máquina de comparação	68

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1. Componentes do estalinho	4
Figura 2.2. Organigrama dos requisitos para exame UE	7
Figura 2.3. Etapas do processo manual	8
Figura 3.1. Organigrama dos actuadores eléctricos.....	11
Figura 3.2. Organigrama dos sensores eléctricos	12
Figura 3.3. Programação grafcet sistema automático.....	17
Figura 3.4. Programação grafcet sistema semi-automático.....	19
Figura 4.1. Etiqueta ATEX (fonte indusmelec) [15].....	22
Figura 4.2. Escudo de protecção.....	26
Figura 5.1. Esquema 3d da máquina de processo automático	29
Figura 5.2. Modelo 3D	30
Figura 5.3. Detalhes da forma e transmissão.....	33
Figura 5.4. Sistema admissão papel	34
Figura 5.5. Sistema de prisão.....	35
Figura 5.6. Início do movimento da prensa	36
Figura 5.7. Fim do movimento prensa.....	37
Figura 5.8. Movimento injectora areia grossa.....	38
Figura 5.9. Detalhe do injectora AgCNO.....	39
Figura 5.10. Posições extremas do enrolador	41
Figura 5.11. Movimento garra mecânica.....	42
Figura 5.12. Alimentador de papel grosso.....	44
Figura 5.13. Deposição do papel grosso.....	45
Figura 5.14. Fim do processo	46

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 6.1. custo de mão de obra	48
--	----

SIGLAS

ASTM – American Society for Testing and Materials

CE – Conformidade Europeia

CAD – Computer Aided Design

DEM – Departamento de Engenharia Mecânica

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

IPQ – Instituto Português de Qualidade

IPAC – Instituto Português de Acreditação

PLC – Programmeable Logic Computer

IEC – International Electrotechnic Commission

CEN – Comité Europeu de Normalização

CENELEC – Comité Europeu para a normalização eletrotécnica

ISO – International Organization for Standardization

ANSI - The American National Standards Institute

NP - Norma Portuguesa

1. Introdução

1.1. Importância do tema

A economia moderna exige às empresas que nela se inserem um nível de produtividade cada vez mais elevado, de forma a manter a rentabilidade num mundo cada vez mais competitivo e globalizado.

No caso da indústria, o custo da matéria-prima está normalmente fora do controlo das empresas de transformação e é semelhante entre as diversas empresas rivais, restando então a redução do custo do processo produtivo.

Categorizando os diversos tipos de produção entre produção manual e produção automática, verifica-se que a produção manual é a que tem maior versatilidade e menor custo inicial, a troco de custos de produção por unidade maiores. Isto deve-se à cadência de produção mais baixa dos trabalhadores em comparação às máquinas, pelo que o aumento de produtividade tende a ser conseguido através da consolidação de empresas dentro de grupos especializados, que produzem um elevado volume de componentes comuns através de processos automáticos.

Simultaneamente, o avanço e disseminação da electrónica e da computação levou a uma diminuição de custos dos componentes usados neste processos automáticos, tanto em termos de investimento inicial como de custos de manutenção. A consequência é a de adopção destes processos por empresas mais pequenas, em que os ganhos de produtividade começam a ultrapassar os custos iniciais e de manutenção exigidos.

No entanto, admitindo que um dado processo manual possa ser realizado de uma forma automática, a fronteira a partir do qual um processo automático torna-se mais rentável em relação a um processo manual não deixa de existir, pelo que é necessário avaliar a viabilidade caso a caso.

1.2. Objectivos

Esta dissertação tem como objectivo principal responder a um desafio colocado por uma empresa portuguesa na área para um estudo sobre a produção automática de estalinhos, artigos pirotécnicos de classe F1.

Pretende-se a realização de um mecanismo em que respeitando as leis e normas em vigor seja obtido o produto final a partir das matérias-primas, nomeadamente uma embalagem contendo 48 estalinhos envolvidos em serradura a partir de folhas de papel de seda, fulminato de prata (AgCNO), areia grossa, um recipiente de papel grosso e uma embalagem de papel cartonado.

O projecto do mecanismo vai ser realizado através de software CAD Solidworks, apresentando-se um projecto simplificado dos componentes necessários bem como da implementação final deste.

Além do mecanismo totalmente automático, vai ser apresentada uma variante para um projecto semiautomático. A fim de verificar se a máquina conceptualizada é adequada, vai ser efectuada uma comparação custo-benefício entre todas as soluções apresentadas, nomeadamente o processo manual, a máquina já existente no mercado, o projecto totalmente automático e o projecto semiautomático.

Adicionalmente, será prestada informação relevante em relação às leis e normas que são necessárias respeitar para que produto seja elegível à obtenção de um certificado CE, dada descrição do processo actual de produção, feita uma revisão de elementos já existentes, e referidas as características que é necessário respeitar para concepção do mecanismo.

Todo o trabalho de investigação foi desenvolvido no Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra.

1.3. Organização da tese

Nesta dissertação está sintetizado um longo trabalho de pesquisa sobre o tema apresentado, a consequente modelação virtual do mecanismo, e uma abordagem inicial ao estudo da viabilidade económica deste.

No Capítulo 1 introduz-se a importância do tema abordado, os objectivos e a estrutura da presente dissertação.

No Capítulo 2 é analisado o produto que se pretende produzir, sendo também mencionada a legislação aplicável para garantir a conformidade dos produtos em estudo, e descrito o método da sua produção.

No Capítulo 3 são descritos os princípios e componentes que estão por base do funcionamento da máquina, as escolhas de projecto efectuadas, e os esquemas de controlo adoptados.

No Capítulo 4 é descrito o enquadramento normativo relevante para a máquina em si, com especial foco na segurança, a fim de demonstrar as soluções adoptadas neste domínio.

No capítulo 5 discute-se o modelo 3D no detalhe que é possível transmitir, descrevendo as operações realizadas e as dimensões relevantes ao longo do processo produtivo.

No capítulo 6 é discutida a viabilidade económica potencial do mecanismo dentro do mercado existente, sendo apresentadas as conclusões e sugestões de trabalho futuro no capítulo 7.

2. Produção de estalinhos

2.1. Matérias primas

O produto final é obtido através de 6 matérias primas, nomeadamente: uma embalagem de cartão canelado, uma embalagem de papel grosso, serradura, folhas de papel de seda, areia grossa, e fulminato de prata.

Destes 6, estão expostos na figura 2.1 os 3 componentes necessários para produzir cada estalinho individual, sendo perceptível a pequena escala que está em jogo.

A embalagem de cartão canelado é o invólucro exterior do produto, estando nele inscrito as características dos estalinhos, processo de utilização, cuidados a ter, certificações alcançadas entre outros. A abertura e o fecho da embalagem realiza-se unicamente através da face superior.

A embalagem de papel grosso mede 75 mm de comprimento, 45 mm de largura e 25 mm de altura e destina-se a selar a mistura de serradura e estalinhos do exterior, tendo uma única abertura numa das extremidades. O fecho da embalagem é feito através da dobra simples da extremidade aberta, que tem como dimensões (quando espalmado) 80 mm de comprimento e 70 mm de largura.

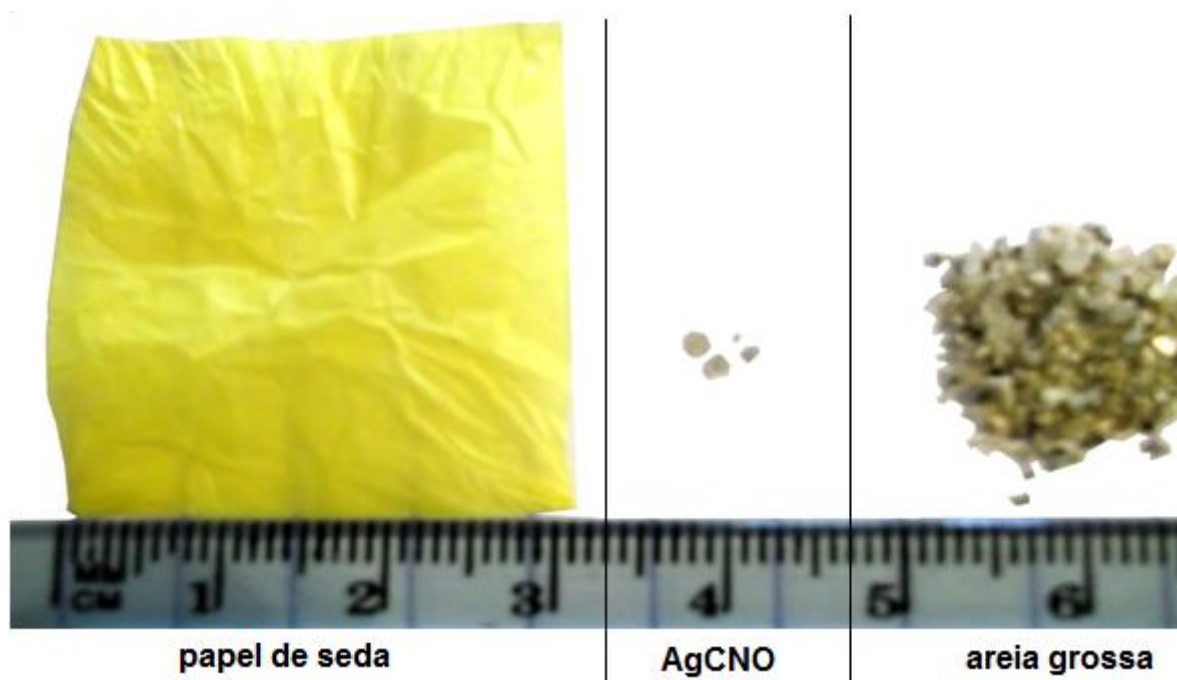


Figura 2.1. Componentes do estalinho

A serradura tem como função a separação física de cada estalinho e a absorção de choques físicos vindos do exterior, contendo cada embalagem um volume aproximado de 3 cm³.

O papel de seda constitui o invólucro exterior de cada estalinho, selando a areia grossa e o fulminato de prata. Como é fornecido na forma de rolos, este é cortado durante o processo até serem obtidos quadrados de papel com 31 mm de lado.

O fulminato de prata (fórmula química AgCNO) é o único explosivo presente no produto. As suas propriedades podem ser consultadas no anexo A, mas de salientar é a sua baixa temperatura de auto-ignição (150° C), a sua insolubilidade em água (o que significa que esta não impede uma explosão), e a sua sensibilidade ao choque, à fricção e à electricidade estática, sendo possível causar detonação sob o efeito do próprio peso se a quantidade de produto for suficiente. Cada estalinho contém não mais de 2,5 mg de material activo.

A areia grossa serve por um lado como enchimento, conferindo volume e peso a cada estalinho, mas também tem como função a absorção e dissipação da energia de explosão do fulminato de prata, pois mesmo lidando com quantidades muito pequenas essas são o suficiente para provocar lesões se estiverem concentradas. Cada estalinho contém cerca de 5 g de areia grossa.

2.2. Legislação e normas aplicáveis

O enquadramento legal para a produção, distribuição e comercialização do produto final é fornecido pelo regulamento dos estabelecimentos de fabrico e armazenagem de artigos pirotécnicos, estabelecido pelo decreto-lei nº 9/2017 [1]. Este transpõe para ordem jurídica interna as directivas europeias em respeito aos artigos pirotécnicos e munições colocados no mercado.

De acordo com a directiva europeia 2013/29/UE [2], o produto final trata-se de um artigo pirotécnico de classe F1, o que significa que deve respeitar (entre outras) as seguintes características:

- Distância de segurança à explosão igual ou inferior a 1 metro
- Nível sonoro à distância de 1 metro não deve exceder 120 dB
- A embalagem ou a própria construção do artigo de pirotecnia devem incluir uma capa protectora.

E como já referido, os estalinhos de categoria F1 não devem conter mais de 2,5 mg de fulminato de prata. A satisfação destas características implica uma grande precisão e controlo de qualidade da máquina que se pretende que produza o estalinho.

O produto já está a ser comercializado pelo fabricante devidamente certificado. No entanto, pelos termos do artigo 6º do decreto-lei supramencionado é necessário proceder a uma reavaliação do produto se existirem alterações significativas no processo de produção, para garantir a conformidade com a norma em vigor.

A verificação de conformidade é feita através do exame UE de tipo baseada no controlo interno de produção com controlos supervisionados do produto a intervalos aleatórios, tal está especificada no anexo II, módulo C2 da directiva europeia.

O organismo nacional de normalização em Portugal e autoridade notificadora nos termos do decreto-lei nº 9/2017 é o Instituto Português da Qualidade (IPQ), sendo que os ensaios internos devem ser realizados pelo laboratório competente do fabricante ou por outro laboratório de ensaios em seu nome e responsabilidade.

Para efeitos de certificação do produto estão definidos na norma NP EN 15947-3:2017-pt [3] os requisitos mínimos de etiquetagem, na norma NP EN 15947-4:2016-pt [4] os meios de ensaio, na norma NP EN 15947-5:2018-pt [5] os requisitos de performance e desempenho e na norma ISO 2859-1 [6] a dimensão do lote, bem como os critérios de aceitação.

Os processos de produção propostos no corpo da tese são total ou parcialmente automatizados, pelo que mesmo para ritmos de produção baixos a garantia do controlo de qualidade não pode ser integralmente assegurado por um trabalhador.

Como tal, são previstos sensores de peso e de volume para parar o processo produtivo se estiverem em falta alguns dos componentes necessários, ou retirar produtos potencialmente defeituosos da linha de montagem para inspeção e acondicionamento futuro.

.O processo de certificação do produto passa por enviar para um organismo notificado um requerimento de exame UE de tipo, cujos elementos estão descritos na figura 2.2 da página seguinte. Após a obtenção do direito de marcação CE, o fabricante terá de preencher uma declaração UE de conformidade conforme está descrito no anexo III da directiva europeia.

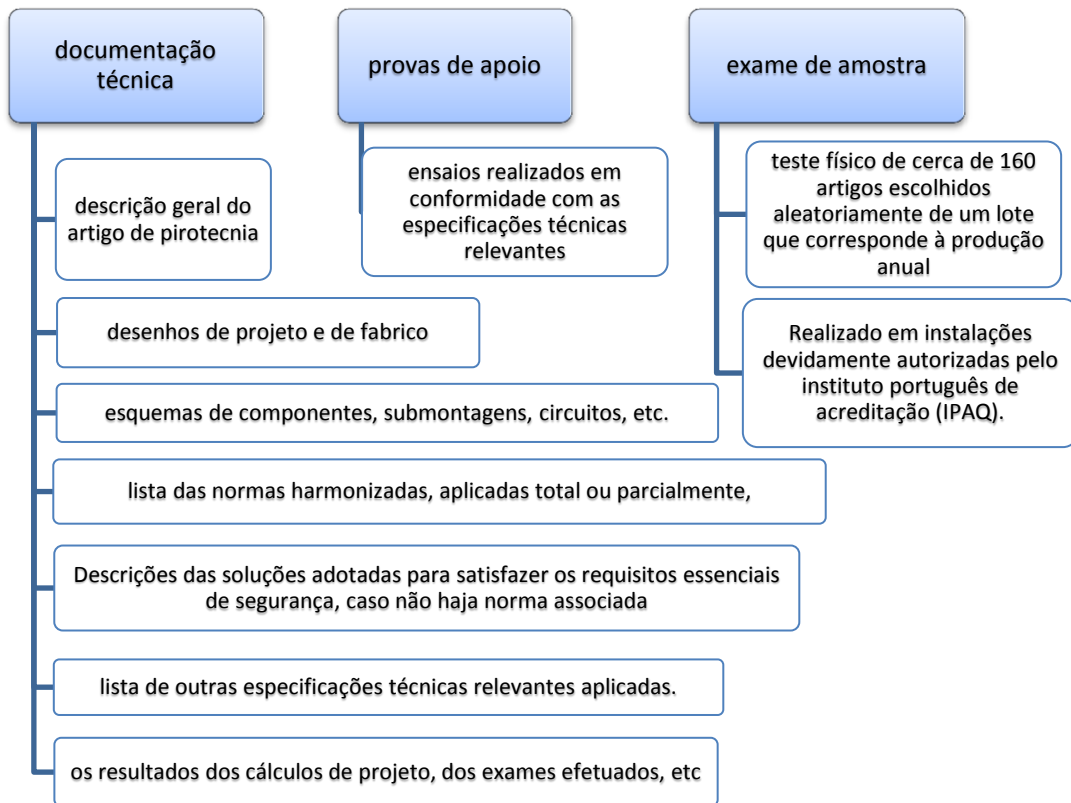


Figura 2.2. Organograma dos requisitos para exame UE

2.3. Método de fabrico actual

O produto é actualmente fabricado de forma manual, artesanal, recorrendo a ferramentas simples. A principal vantagem do processo de fabrico actual é o custo irrisório de início e manutenção da produção, dado o pequeno volume e custo total das ferramentas necessárias até ao fim da sua vida útil.

Uma outra vantagem do processo actual é a sua relativa flexibilidade, pois este pode ser realizado por um único trabalhador se necessário, mas também dividido facilmente em dois ou três segmentos mais simples em série permitindo algum nível de especialização dos trabalhadores. As fases do processo e os respectivos tempos médios de execução por estalinho obtido são descritas na figura 2.3.

Analisando a figura 2.3 verifica-se que as fases **3** e **5** são consideravelmente mais morosas que as restantes, o que significa que em termos industriais a “linha de montagem” está desequilibrada, limitando os ganhos em termos de ritmo de produção e a produtividade para um esquema de produção em série.

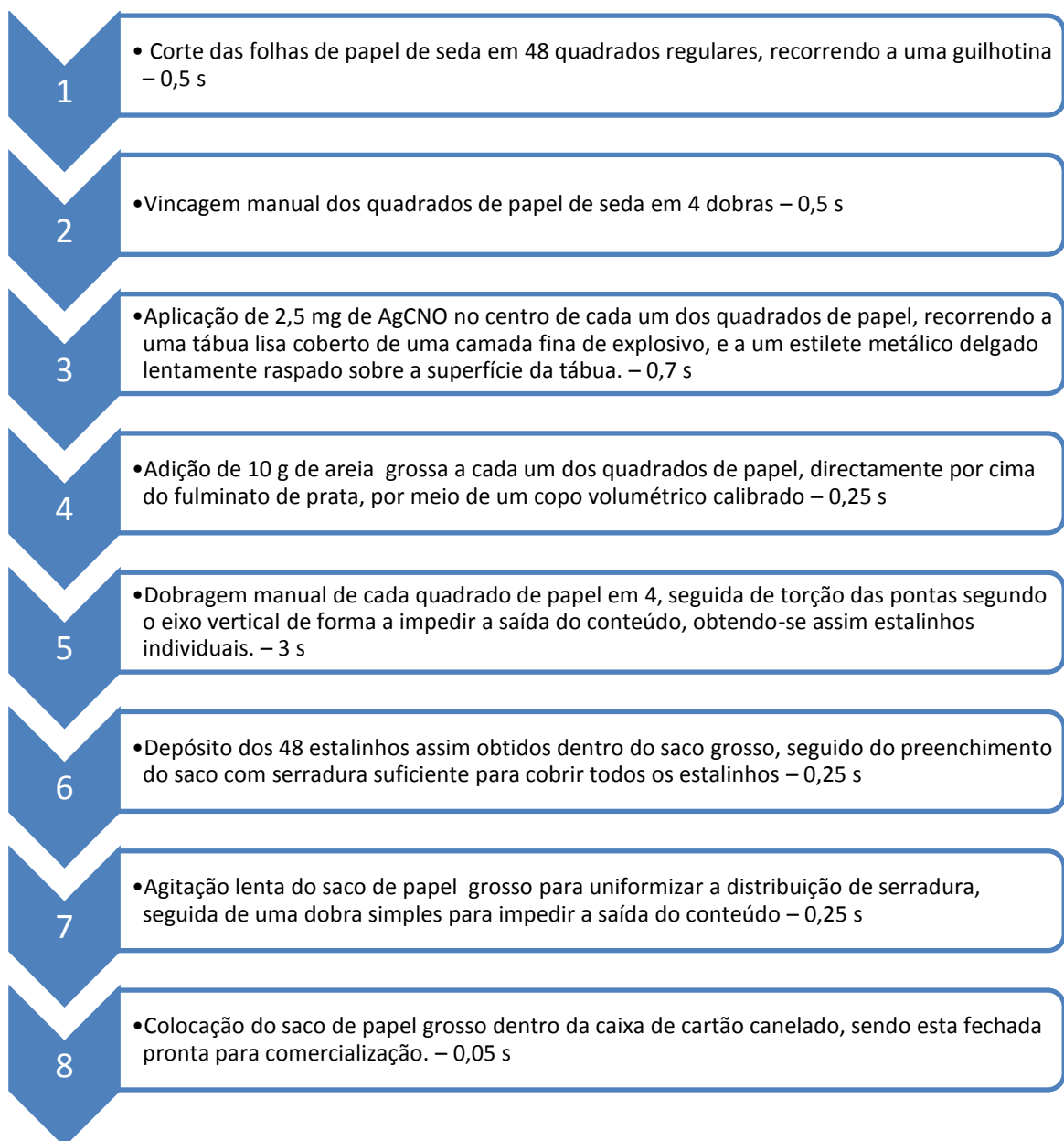


Figura 2.3. Operações do processo manual

Recorrendo a um único trabalhador, o fabrico de cada estalinho demora em média 5,5 segundos, ou seja uma caixa de 48 estalinhos demora cerca de 4 minutos e 24 segundos a realizar. Num dia normal de 8 horas de trabalho, um trabalhador produz cerca de 109 caixas.

A segunda limitação do processo prende-se com o facto de não serem utilizadas ferramentas calibradas exactas, em particular na fase 3 em que é necessário aplicar uma quantidade extremamente pequena e precisa de AgCNO. A consequência é a de que é necessário muito treino e experiência (cerca de 2 anos de acordo com o

fabricante) para um trabalhador conseguir garantir a qualidade do produto final de uma forma regular.

A combinação destes dois últimos factores (baixa produtividade e difícil aprendizagem) torna difícil aumentar a produção para responder a um aumento de procura, pois o balanço entre a recompensa e esforço despendido para um novo trabalhador é desfavorável.

A solução deste último problema pode passar pela automatização do processo, mas para este ser possível é necessário dividir fases de execução complexas num número de fases com cinemática simples, com poucos graus de liberdade.

3. Bases para automação

3.1. Sistemas de automação industrial

Os sistemas de automação industrial existentes actualmente podem ser divididos globalmente em quatro tipos principais, tendo em conta o meio usado para transmitir a potência. São estes os sistemas **mecânicos**, sistemas **hidráulicos**, sistemas **pneumáticos** e sistemas **eléctricos** [7].

Os sistemas **mecânicos** apresentam a maior eficiência em termos de transmissão de potência, mas crescem rapidamente em complexidade quando a sequência de operações a realizar é extensa, o que sendo o caso os torna inadequados para a tarefa pretendida.

Os sistemas **hidráulicos** são capazes de transmitir potências e forças elevadas e de realizar tarefas complexas sem grande custo ao utilizar diferentes combinações de válvulas padrão, mas estão sujeitos a perigos de derramamento do líquido hidráulico num qualquer ponto do circuito. A máquina em estudo trabalha a níveis de potência e forças baixos, pelo que não foi escolhido este tipo de sistema por se considerar que as vantagens não compensam os riscos.

Os sistemas **pneumáticos** têm características semelhantes aos sistemas hidráulicos, trabalhando com potências e forças mais baixas em relação a estes mas sem ter problemas a nível de fugas de líquido hidráulico, bem como sendo ainda mais simples de implementar pois é possível dispensar o circuito de retorno ao dispersar ar comprimido na atmosfera.

No entanto, o regime de funcionamento normal da máquina implique que esta trabalhe com agentes explosivos extremamente sensíveis. Uma fuga de pressão no ponto errado representa um risco de explosão, seja directamente por acção de um jacto, ou indirectamente ao dispersar pó de AgCNO na atmosfera. Por outro lado, o controlo de movimentos lentos com forças pequenas está sujeito aos efeitos do atrito de Coulomb nos actuadores, potencialmente resultando em movimentos erráticos.

Tendo em conta todos estes motivos, optou-se por um sistema de automação industrial integralmente **eléctrico**. Este apresenta a vantagem de poder ser comandado directamente por um sistema de controlo electrónico, como o são a maioria dos sistemas actuais, e que ao contrário de todos os sistemas anteriores não ser necessário um grupo motor/propulsor dedicado para o fornecimento de energia motriz, pois esta pode ser retirada da rede eléctrica por via de um ou vários transformadores e rectificadores, conforme a qualidade de corrente eléctrica necessária.

Esta opção não é, no entanto, isenta de riscos. Estando envolvidas potenciais atmosferas explosivas, o risco de explosão devido a uma faísca, mesmo de baixa potência, é significativo. Por outro lado, os actuadores eléctricos tendem a ter dimensões superiores e são muito mais sensíveis à temperatura de funcionamento que os actuadores mecânicos, hidráulicos e pneumáticos equivalentes, o que pode dificultar a concepção da máquina. No entanto, após ter avaliado as diferentes opções é esta última que aparenta ser a mais acertada.

Existem também soluções híbridas como a electropneumática ou a hidropneumática, que permitem escolher os sistemas mais adequados para a tarefa a realizar, combinando as suas vantagens. No entanto, esses sistemas tendem a ter uma manutenção mais complexa dado as diferentes especificidades dos sistemas, pelo que essa solução também não foi adoptada, mesmo sabendo que esses sistemas híbridos não são necessariamente mais complexos.

3.1.1 Actuadores eléctricos

De uma forma geral, admite-se que os actuadores eléctricos a nível industrial podem ser classificados conforme é apresentado na figura 3.1.

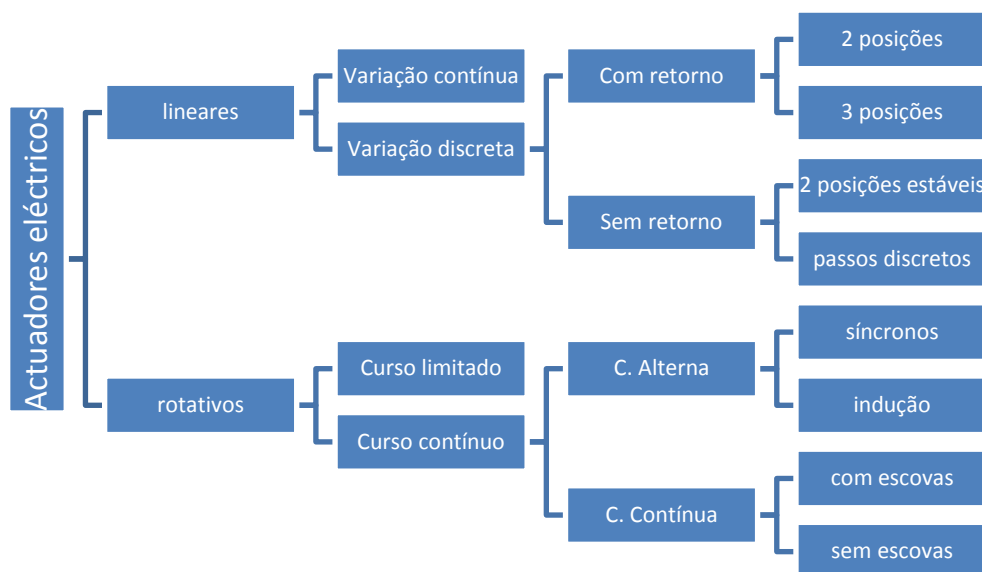


Figura 3.1. Organigrama dos actuadores eléctricos

No caso dos actuadores eléctricos lineares os actuadores mais comuns e acessíveis (e portanto aqueles que devem ser utilizados) são aqueles com duas posições, uma das quais estável, ou actuadores de três posições, em que a posição central é estável.

Diz-se que a posição é estável se puder ser mantida pelo actuador sem intervenção do sistema de controlo, o que em ambos estes casos significa que a posição é mantida por uma mola, enquanto o actuador eléctrico está desligado.

Uma particularidade dos actuadores eléctricos é o destes aquecerem quando uma corrente lhes é aplicada, mesmo se não ocorrer movimento. Logo para evitar o sobreaquecimento e aumentar a longevidade, é recomendado que estes actuadores sejam accionados apenas em períodos breves.

Esse cuidado só se estende aos actuadores de movimento rotativo contínuo se a velocidade de rotação for muito inferior à frequência nominal, pois nesse caso o arrefecimento é mínimo e a corrente eléctrica é igual ou superior à nominal, gerando mais calor por efeito de joule.

Se por um lado os actuadores eléctricos lineares na generalidade trabalham com corrente contínua (CC) a atravessar um solenóide, e o mesmo se aplica aos motores rotativos de curso limitado, os motores eléctricos rotativos contínuos podem ser subdivididos em motores CC ou motores de corrente alternada (CA).

Os dois tipos de motor CC distinguem-se entre si de forma semelhante, sendo que os motores CC sem escovas são mais eficientes mas mais caros, pelo que se evitou optar por estes últimos.

Os motores CA são tipicamente motores de potência média a alta, nível de potência que só é necessário na máquina projectada para imprimir movimento às linhas de montagem e imprimir movimento à prensa. Como os motores síncronos requerem um circuito electrónico de controlo para funcionarem eficazmente a uma velocidade de rotação diferente da nominal e a linha de montagem avança pulsadamente, foi considerado preferível optar por motores de indução.

3.1.2 Sensores

Estão previstos ser necessários 5 tipos de sensores, representados na figura 3.2:

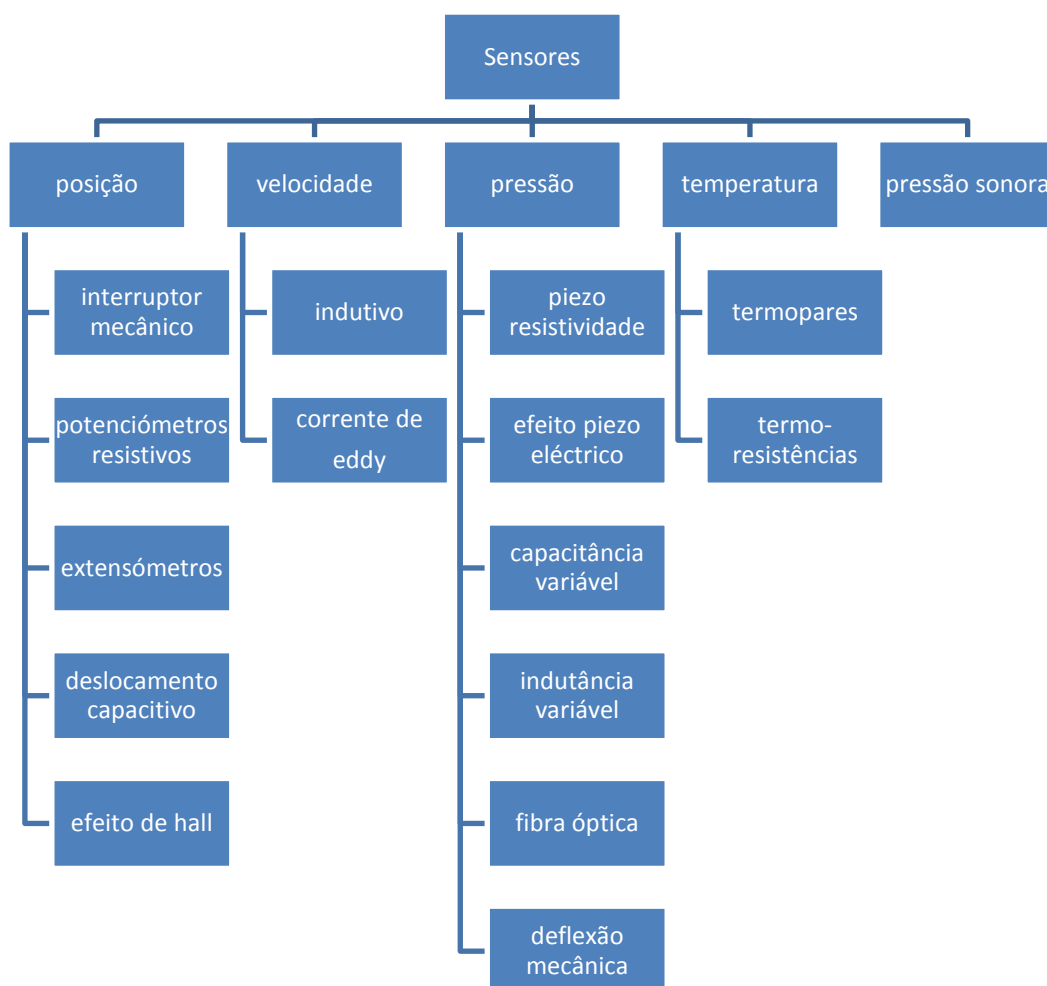


Figura 3.2. Organograma dos sensores eléctricos

Para a operação da máquina objecto de tese, foi determinado que todos os sensores que nela operam devem devolver um sinal eléctrico analógico de corrente contínua.

Por um lado, sensores que devolvem um sinal eléctrico directo permitem evitar o acréscimo de erros associado ao processo de conversão.

Por outro lado, se é verdade que os sensores que transmitem sinais digitais são menos susceptíveis a erros causados por anomalias da transmissão de dados, estes obrigam forçosamente à utilização de um sistema electrónico para a sua correcta interpretação, o que limita a escolha do sistema de controlo e dificulta a sua substituição, para além de tendencialmente serem mais dispendiosos. Os erros de transmissão de dados neste caso em particular são minimizados pelo regime de operação se tratar de uma máquina estacionária, sujeita a condições ambientais estáveis.

Finalmente, a utilização de corrente contínua simplifica consideravelmente o sistema de controlo, pois os sistemas de controlo em corrente alternada não são tão universais.

Entre os tipos de sensores de **posição** aplicáveis, os potenciómetros resistivos, os extensómetros e os sensores de deslocamento capacitivo não se adequam à utilização exigida, pois no primeiro caso não está prevista a necessidade de medição de movimentos complexos, no segundo caso não é necessário efectuar medição da deformação, e no segundo caso as gamas de deslocamento são muito superiores ao regime de operação do sensor.

Os interruptores simples devolvem sinais binários de ligado ou desligado, sendo usados em todos os tipos de actuadores lineares para controlar a sua posição. Os sensores de efeito de hall têm a vantagem de trabalhar sem contacto entre peças, pelo que são adequados para determinar a posição relativa de peças em movimento como as linhas de montagem e a parede interior rotativa.

Não é necessário um controlo de **velocidade** dedicado, pois o controlo da velocidade de produção é realizado através de intervalos de espera. No entanto este sistema não é ideal, e talvez tivesse algum interesse poder mudar a velocidade de operação de alguns motores, recorrendo a um sensor de velocidade indutivo ou de corrente de Eddy, a fim de otimizar o desgaste das peças, mas a hipótese foi omitida porque nem todos os controladores no mercado possuem essa capacidade.

Os sensores de **pressão** podem ter vários princípios de funcionamento diferentes, incluindo piezo resistividade, efeito piezo eléctrico, capacitância variável, indutância variável, fibra óptica e deflexão mecânica, entre outros. Destes, os sensores

mais comuns e acessíveis são os de piezo-resistência, sendo aplicados em todos os pontos em que é necessário determinar uma carga.

A única excepção corresponde ao sensor usado para medir o peso da caixa de cartão canelado durante a fase **6.d)**, em que é mais indicado a utilização de um sensor piezo eléctrico em paralelo, pois este tipo de sensor é particularmente adequado à detecção de uma variação de peso, o que permite realizar uma contagem do número de estalinhos presentes na embalagem e comparar com peso calibrado esperado. Se houver discrepâncias, a produção pára para corrigir o erro.

Os sensores de **temperatura** na máquina projectada destinam-se apenas e só para garantir que não é atingida uma temperatura próxima da auto-ignição em pontos críticos, sendo que os sensores aplicáveis mais comuns são os termopares, e as termo-resistências. Estas últimas são mais precisas mas requerem uma fonte de energia para operar, mas como não é necessária grande precisão na determinação da temperatura, e existe disponível uma fonte de energia adequada qualquer um dos dois tipos de sensor pode ser empregado.

Finalmente, o sensor de **pressão sonora** é usado apenas e só para detectar explosões acidentais durante o funcionamento da máquina, e accionar o sistema anti-fogo respectivo.

3.1.3 Controlo

Mesmo não se tratando de máquinas puramente eléctricas como é o caso do objecto desta tese, a prática comum para o controlo de automatismos a nível industrial é este ser realizado através de sistemas electrónicos, seja por circuitos integrados fixos ou sistemas computadorizados interligados, dependendo do nível de sofisticação e complexidade da unidade fabril.

Tendo em conta a escala da máquina projectada, só são viáveis essencialmente duas opções; ou a utilização de circuitos integrados fixos, ou a utilização de um PLC – Programmable Logic Computer, em português autómato programável, que são unidades computadorizadas equipadas para interagir directamente com sensores e actuadores.

A principal vantagem destes últimos em relação aos primeiros deve-se ao facto de estes serem programáveis, pelo que é possível introduzir alterações no processo produtivo conforme necessário, sem ter que substituir componentes físicos na máquina.

Um exemplo desta capacidade consiste na alteração do número de estalinhos por embalagem, em que no primeiro caso seria necessário alterar o circuito integrado que realiza a contagem de estalinhos, enquanto no segundo caso basta estabelecer uma ligação com um computador para alterar a variável contendo o número de estalinhos necessário, sem sequer ser necessário alterar fundamentalmente o programa.

A segunda vantagem dos autómatos programáveis é a de estes estarem disponíveis no mercado em grandes quantidades e qualidades, para todo o tipo de escala e complexidade. A produção e utilização destes produtos tem sido crescente, tornando-os mais acessíveis e económicos, mas também torna mais fácil o acesso a ferramentas e técnicos de apoio na instalação, diagnóstico, manutenção e substituição do aparelho pois o mesmo aparelho pode ser utilizado por máquinas diferentes, enquanto os circuitos integrados têm de ser concebidos de raiz para a máquina específica. Apesar disso os PLC continuam a ser uma opção dispendiosa relativamente aos circuitos integrados, pelo que ambas as opções foram consideradas.

Para ambas as opções é possível ligar directamente ao sistema de controlo actuadores e sensores. Quando a gama de voltagens/correntes eléctricas estiver fora da gama de valores admissíveis, recorrem-se respectivamente a amplificadores de sinal, relés e pontes de Wheastone conforme for necessário amplificar sinais de sensores ou sinais de actuação de motores, activar motores eléctricos de corrente alterna, ou medir variações de resistência muito pequenas.

A alimentação do sistema de controlo é feita através de um transformador ligado à rede pública eléctrica acoplado a um rectificador C.A – C.C, não sendo considerado necessário qualquer tipo de armazenagem temporária de energia a fim de impedir interrupções bruscas de produção, embora possa ser adoptado um sistema desse tipo no futuro sem grandes dificuldades.

3.2. Esquema automático

Tipicamente a linguagem de programação usada em PLCs é um código comercial específico a cada fabricante, pelo que tem de ser adaptado ao controlador específico. Para uniformizar as técnicas de programação, a comissão electrónica internacional (IEC) definiu 5 esquemas de programação comuns na norma IEC 61131-3 [8].

Na figura 3.3 apresenta-se o esquema de controlo da máquina na forma de um grafcet, tornando-se evidente a complexidade do sistema automático. O grafcet está organizado de cima para baixo, partindo a máquina de um estado inicial vazio antes de poder iniciar a sequência, assinalado com o quadrado número 0, a verde. O significado dos índices usados pode ser consultado nas três tabelas de sinais do grafcet presentes no anexo B do trabalho.

O estado número 1 corresponde ao estado de espera, em que o autómato está ligado, mas a máquina está forçosamente parada, com todos os actuadores desligados. Este estado só é atingido quando o autómato é ligado ou a máquina parada forçosamente, e o estado seguinte só atingido quando os botões assinalados com S1 e S2 estão activados em simultâneo.

Em termos de nomenclatura utilizou-se o sinal (-) para indicar que um sinal tem de estar desactivado ou negado, o sinal (\times) para indicar a conjunção de sinais (\cap), o sinal (+) para indicar a disjunção de sinais, e expressão ($A=A+1$) para indicar que é adicionado o valor 1 ao valor já existente da variável ou conjunto de variáveis.

No estado normal de funcionamento, existem vários processos a ocorrer em simultâneo, representados pelas diversas colunas. A primeira coluna à esquerda é dedicada à parte de entrada do papel, a segunda coluna dedicada à parte da prensagem, a terceira coluna dedicada à parte da linha de montagem dos estalinhos, e a quarta coluna é dedicada à parte do empacotamento dos estalinhos.

Do lado direito do gráfico temos, essencialmente, sistemas de emergência e pequenas sub-rotinas que devolvem a máquina a uma posição de equilíbrio. A maior parte dos mecanismos está equipado com molas de retorno em que basta cortar a electricidade para que estas voltem à posição inicial e dispensem estes sistemas, mas outros motores sem retorno como o motor da prensa ou o motor da prisão ficariam “presos” se, por acaso, a máquina for iniciada e estes estivessem colocados numa posição intermédia.

Outros motores contínuos como o motor da linha de montagem e o alimentador do papel de cartão não precisam deste artifício, pois a sequência inicia-se sem que estes tenham de estar numa posição específica.

Tratando-se todos os actuadores de sistemas eléctricos, é perigoso se uma das sub-rotinas não progredir a partir de um certo intervalo de tempo (se por exemplo um sensor deixar de funcionar), pelo que se define um tempo máximo para a execução de uma tarefa antes que algum dos motores sobreaqueça, e sucedam consequências mais graves.

Os sistemas de emergência estão essencialmente divididos em dois “níveis”, sendo que no nível mais baixo o conjunto da máquina não pára instantaneamente, pois o problema que gerou o erro não é necessariamente urgente (pode ser simplesmente a falta de matéria prima) e assim evita-se que a máquina deixe uma tarefa incompleta. O segundo nível implica a paragem total e imediata de todos os sistemas, e a máquina só pode voltar a funcionar após permissão de um operador.

Para facilitar a resolução de problemas estabelece-se um sistema de diagnóstico básico para indicar a zona em que ocorreu o erro. O sinal E1 pode, por exemplo, accionar uma simples luz num painel de controlo. Sistemas mais complexos como usados num automóvel actual podiam indicar a peça específica que entrou em falha, mas são de tal forma complexos que o próprio sistema de emergência pode gerar problemas, e não se justificam numa máquina em que é simples fazer uma inspecção visual.

Indica-se no gráfico como o operador pode alterar alguns parâmetros de produção de uma forma simples (alterando umas constantes) nomeadamente o número de estalinhos por caixa, a tolerância do controlo de qualidade e o ritmo de produção, sem ser necessário alterar completamente o código.

Não estão previstos sistemas de controlo de qualidade dedicados, pois no final deste processo é obtido uma caixa de cartão canelado contendo um saco com os estalinhos e a serradura, que tem de ser fechado por um operador humano; deixa-se, portanto, a parte do controlo de qualidade para um trabalhador, o que permite simplificar a parte final do processo, já de si complexa.

O graficet exposto poderia ser traduzido directamente para uma máquina, mas seria preciso recorrer a um simulador para verificar se em algum ponto do processo não à um momento em que o sistema bloqueie, e não seja capaz de se libertar.

3.3. Esquema semi-automático

No caso do esquema semi-automático, foi admitido que não é necessário realizar o passo do empacotamento, pois na prática para obter cada caixa é necessário produzir pelo menos, 48 estalinhos – e se um trabalhador consegue num determinado período de tempo realizar uma tarefa (no caso, colocar o explosivo num estalinho), a realização de uma tarefa que demora 48 vezes mais tempo é bem menos importante.

O sistema semi-automático é muito mais simples, como é imediatamente aparente ao comparar o respectivo grafcet da figura 3.4 com o grafcet da figura 3.3:

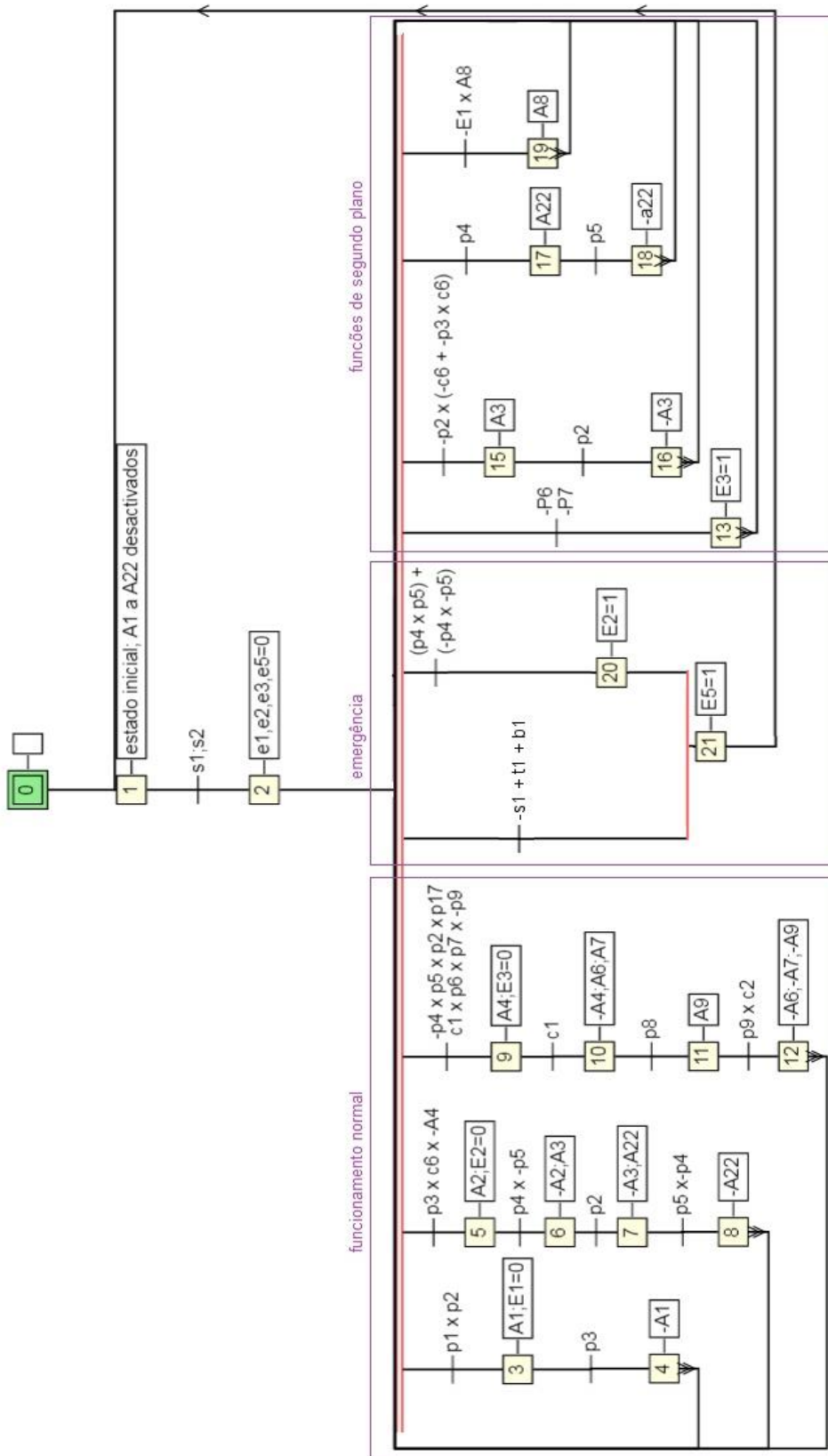


Figura 3.4 Programação grafcet sistema semi-automático

As principais diferenças em relação ao sistema automático são:

- Cada passo basilar (o avanço da linha de montagem de estalinhos) só pode ocorrer cada vez que o operador acciona um interruptor,
- O sistema não recorre a memórias ou relógios digitais de qualquer tipo, pelo que pode ser realizado sem nenhum autómato, embora sendo necessário um sistema de controlo dedicado para manter os sinais anteriores (circuito integrado, quadro de relés, etc)
- A alteração de características implica necessariamente a alteração do sistema. Por exemplo, para alterar o número de passos realizados pela linha de montagem cada vez que o operador pressiona o botão para iniciar o avanço, é necessário alterar a roda dentada física que faz a contagem do sistema, em vez de alterar uma variável.

O sistema de detecção de erros resulta também muito mais simplificado, pois assume-se que o operador está em permanência a vigiar o funcionamento da máquina e percebe quando sucede algum problema. Mantêm-se o sistema de aviso de erros por uma questão de conveniência.

A limitação do sistema semi-automático torna-se mais evidente quando se pretendem ritmos de produção maiores, mas justifica-se quando se pretendem usar sistemas mais simples – no limite, a máquina podia ser reduzida a uma simples linha de montagem, com um trabalhador a realizar a sua tarefa especializada no seu posto dedicado, o que apesar de tudo poderia resultar num aumento de produtividade.

Para ambos os gráficos, não estão incluídos todos os sensores e actuadores que seriam implementados, pois é possível realizar diversas variantes deste sistema, mas os que forem colocados em excesso podem ser colocados em paralelo. Por exemplo, em vez de um sensor T1 pode existir sensores de T1 a T6 ligados à mesma porta, seis injectores ligados à porta A8 e A9 em vez de apenas 1, etc.

A validade de ambos os esquemas de controlo foi testada recorrendo ao programa de código aberto *classicladder 0.9.112*, capaz de simular o funcionamento de um PLC de forma virtual.

4. Legislação

Esta secção destina-se a delinear regras de segurança que devem ter sido em conta na concepção, mas também na utilização da máquina objecto desta tese. Para o efeito vão ser referidas as directivas e normas europeias em vigor aplicáveis, definidas as

medidas específicas tomadas para as respeitar, e abordado o processo de certificação que seria necessário seguir de forma a obter uma marcação CE.

Tendo em conta que a máquina objecto de tese está pensada para ser realizada como um exemplar único e não está planeada para comercialização no espaço europeu, poder-se-ia considerar a questão da certificação supérflua, pois é apenas necessário obter a certificação em relação ao produto.

No entanto, a certificação do processo produtivo torna-se necessária se se pretender importar para o espaço europeu uma máquina que não tenha sido legalizada, como é o caso de uma das alternativas usadas como referência para a comparação económica, pelo que o processo de certificação é abordado no âmbito desta tese.

4.1. Legislação EU para o fabrico

A legislação portuguesa no que respeita a equipamento destinado a trabalhar em atmosferas potencialmente explosivas é aplicada com base no definido no Decreto-Lei n.º 111-C/2017 de 31 de Agosto [9], e no Decreto-Lei 236/2003 de 30 de Setembro [10]. Ambos os Decretos-Leis são transposições para a ordem jurídica interna portuguesa de duas directivas europeias actualmente em vigor, nomeadamente a directiva 2014/34/UE [11] destinada ao produto e a directiva 99/92/CE [12] destinada ao espaço de trabalho, que em conjunto com a lista de normas harmonizadas C 209/1 [13] constituem o sistema de certificação europeu ATEX.

A certificação ATEX é um requisito obrigatório para a comercialização de produtos destinados a atmosferas potencialmente explosivas no espaço económico europeu, mas não é aplicável a equipamentos destinados a trabalhar com explosivos propriamente ditos, que não são regulados.

Como tal só foram tomados como indicação de bons critérios de segurança a seguir no que respeita à construção da máquina em si, mas é preciso ter em conta no que respeita à selecção dos seus componentes eléctricos de forma a garantir que funcionam de forma segura, e em particular que cumprem a norma IEC 60079-0 [14] que lhes é específica.

Para explicar melhor os requisitos ATEX, apresenta-se na figura 4.1 um esquema da etiqueta que os componentes homologados devem apresentar:

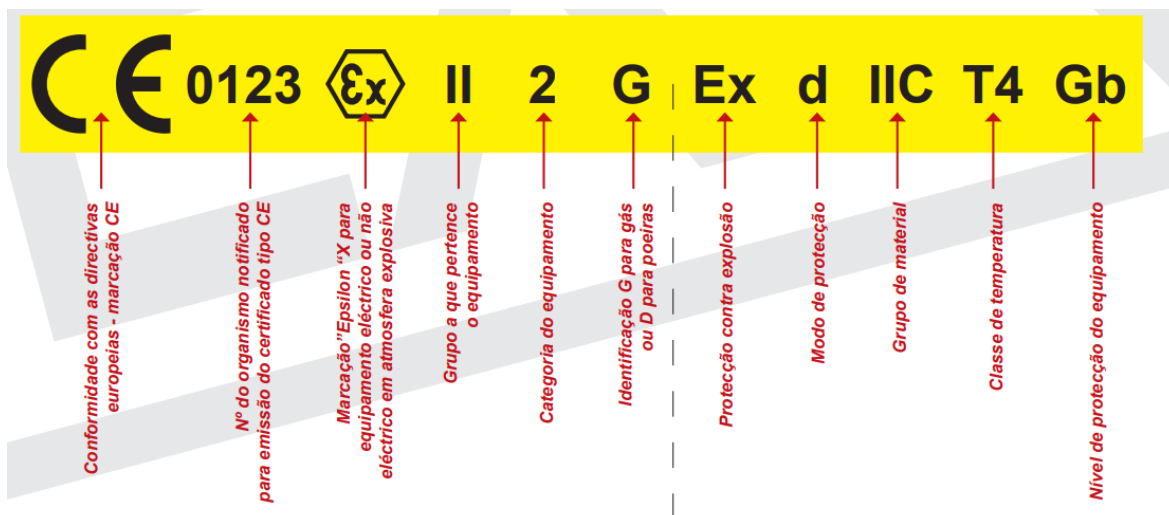


Figura 4.1 Etiqueta ATEX (fonte indusmelec) [15]

Segundo a diretiva 2014/34/UE, o aparelho em estudo pode ser classificado como sendo de grupo II (poeiras), nível de protecção 2 (elevado). Estando especificado a categoria do equipamento, passa a ser possível determinar a classificação da zona em que equipamento vai ser utilizado, a fim de serem determinadas as medidas de segurança para os trabalhadores conforme a directiva 99/92/CE.

A divisão em zonas perigosas depende da frequência e matéria combustível da atmosfera explosiva, correspondendo a zona de operação (armazenamento e enchimento da matéria ativa) da máquina à zona 22 (poeiras explosivas de risco elevado). No que respeita aos restantes parâmetros para a selecção dos componentes eléctricos:

O modo de protecção define as características de estanquicidade do componente, e é restringido com base na zona aplicável e no tipo de atmosfera:

- Entre as diversas classificações possíveis, são admissíveis os modos de protecção tD, maD, mbD, iD.

O grupo de material depende das características da atmosfera:

- É admissível que o componente tenha a classificação IIIB ou IIC, destinada a atmosferas compostas por poeiras não-condutoras.

A Temperatura de ignição é uma classificação que depende da temperatura mais baixa de uma superfície aquecida a partir do qual pode ocorrer auto-inflamação da atmosfera circundante. A gama de temperatura é definida da temperatura mais elevada à temperatura mais baixa de T1 a T6.

- São apenas admissíveis componentes de classe de temperatura T4, T5 ou T6, pois a temperatura de auto-ignição não deverá exceder os 150 °C.

Finalmente, é de referir que em relação à manutenção, a reparação de equipamentos ATEX tem de ser feita por empresas certificadas ao abrigo da norma IEC 60079-19 [16] - Reparação, revisão e recuperação de equipamentos destinados a atmosferas explosivas.

Sem essa certificação é apenas possível substituir componentes defeituosos por outros componentes devidamente certificados, de forma que o equipamento mantenha uma certificação válida, o que implica estimar maiores custos de reparação.

4.2. Deficiências de concepção a evitar

A diretiva europeia 2014/34/EU especifica no anexo II as diversas medidas de segurança que devem ser adoptadas na concepção e uso destes, bem como dos sistemas de protecção que devem ser incluídos.

Esses requisitos são definidos a vários níveis, desde recomendações genéricas em termos de variáveis a ter em conta, a medidas de segurança específicas comuns a todas as condições de funcionamento possíveis, até medidas específicas para a classe em que o mecanismo se insere.

Entre as recomendações genéricas, é definido como objectivo principal da integração de segurança contra explosões o minimizar da produção ou disseminação de atmosferas explosivas por parte do aparelho, bem como o impedir a formação de fontes de ignição de qualquer espécie. Como objectivo secundário, é definido que na eventualidade de ocorrer qualquer explosão, esta deve ser contida, redireccionada ou rapidamente suprimida de forma a não colocar em perigo pessoas, animais ou bens.

Entre as recomendações específicas gerais, contam-se

- A necessidade de marcação que contenha identificação, marcação específica de proteção contra explosões (conforme norma IEC 60079-0) e todas as indicações indispensáveis à segurança da utilização do aparelho.
- A necessidade de incluir um manual de utilização completo que inclua instruções, esquemas e parâmetros para a realização sem riscos da entrada em serviço, utilização, montagem e desmontagem, manutenção, instalação e afinação.
- Os dispositivos de segurança devem funcionar independentemente dos outros dispositivos de controlo e medição, e actuar directamente sem intervenção de um sistema informático. Após qualquer paragem de emergência deve entrar em funcionamento

um sistema de bloqueio que tenha de ser reiniciado em separado para que seja permitido um novo arranque.

- Os sistemas automáticos devem ser concebidos para que seja possível serem desligados manualmente a qualquer momento, desde que as condições de segurança não sejam comprometidas

- Sempre que seja accionado um sistema de corte, a energia acumulada no mecanismo deve ser dissipada rápida e seguramente para minimizar qualquer risco, a não ser que se trate de energia sob a forma electroquímica.

Finalmente, é preciso levar em consideração as recomendações específicas particulares à classe em que o aparelho se insere, nomeadamente ao Grupo II, nível dois, poeiras em suspensão, pelo que se aplicam as seguintes disposições:

- Os aparelhos devem ser fabricados de modo a que, tanto quanto possível, a poeira possa penetrar no seu interior ou dele sair apenas pelos lugares dos aparelhos previstos para o efeito. As entradas de cabos e peças de ligação previstas devem satisfazer igualmente este requisito.

- Para evitar a ignição das poeiras em suspensão, as temperaturas de superfície das partes do aparelho devem ser francamente inferiores à temperatura de ignição previsível das poeiras em suspensão.

4.3. Procedimentos de Segurança

Adicionalmente às medidas de segurança referidas, é necessário também levar em conta as prescrições mínimas de protecção e da saúde dos trabalhadores que estão definidas na directiva europeia 99/92/CE. Embora a regulamentação do pessoal trabalhador qualificado não seja abrangido no âmbito desta tese, julgou-se conveniente referir as medidas e sistemas de segurança mínimos necessários para o trabalho exposto a atmosferas potencialmente explosivas que não estão incluídos na directiva anterior. São estes:

- Tem de ser elaborado e mantido actualizado um documento a seguir designado por documento sobre a protecção contra explosões, elaborado antes do início do trabalho e revisto sempre que se efectuem modificações, ampliações ou transformações importantes no local de trabalho, nos equipamentos e ou organização do trabalho.

- A fim de prevenir os riscos de ignição iniciada por descargas electrostáticas provenientes dos trabalhadores ou ambiente de trabalho, estes deverão dispor de vestuário

de trabalho adequado, constituído por materiais que não originem descargas electrostáticas que possam inflamar atmosferas explosivas.

- Sempre que seja detectado risco de explosão, os trabalhadores devem ser advertidos por sinais ópticos e/ou acústicos para evacuarem o local, antes de serem verificadas as condições de segurança.
- Serão previstas e mantidas em boas condições saídas de emergência de forma a garantir que em caso de perigo os trabalhadores possam abandonar as instalações em risco rapidamente e com segurança.

A instalação, os equipamentos de trabalho, os sistemas de protecção e respectivos dispositivos de ligação só serão postos em serviço se o documento sobre a protecção contra explosões indicar que podem ser utilizados com segurança na presença de atmosferas explosivas.

4.4. Protecção adoptada

O sistema de protecção adoptado na máquina consiste numa estrutura cilíndrica oca em aço com 872,5 mm de comprimento, 360 mm de diâmetro exterior, 10 mm de espessura na superfície curva, e 20 mm de espessura na superfície plana, tal como descrito na figura 4.2 da página seguinte.

Esta espessura já por si assegura uma protecção significativa, e o formato cilíndrico permite resistir a pressões de uma forma bastante uniforme sem ter os problemas de fabrico associados a um escudo esférico ou a um cilindro de extremidades esféricas (que são mais eficazes), mas visto que o comprimento é significativamente maior que o diâmetro (logo o ponto fraco corresponde à parede curva), optou-se por reforçar esta superfície com 6 nervuras cilíndricas de 25 mm de comprimento e 5 mm de altura em relação ao diâmetro exterior, distando entre si cerca de 165 mm.

A solução de utilizar as nervuras permite evitar ter de aumentar excessivamente a espessura de todo o escudo de protecção, com as respectivas consequências em termos de peso da máquina e custo de material.

Estas nervuras são também utilizadas como ponto de apoio para a porta de acesso aos componentes, que é deslizante e não basculante tanto para evitar que a porta se abra sob o efeito de uma explosão se estiver incorrectamente fechada, como para evitar quaisquer correntes de ar que se gerem no processo de abrir e fechar a porta.

A abertura da caixa é feita através do deslocamento de dois pistões laterais, o que só por si não respeita o requisito genérico de esta abertura ser feita recorrendo a ferramentas especializadas, mas tal pode ser facilmente adaptado ao sistema.

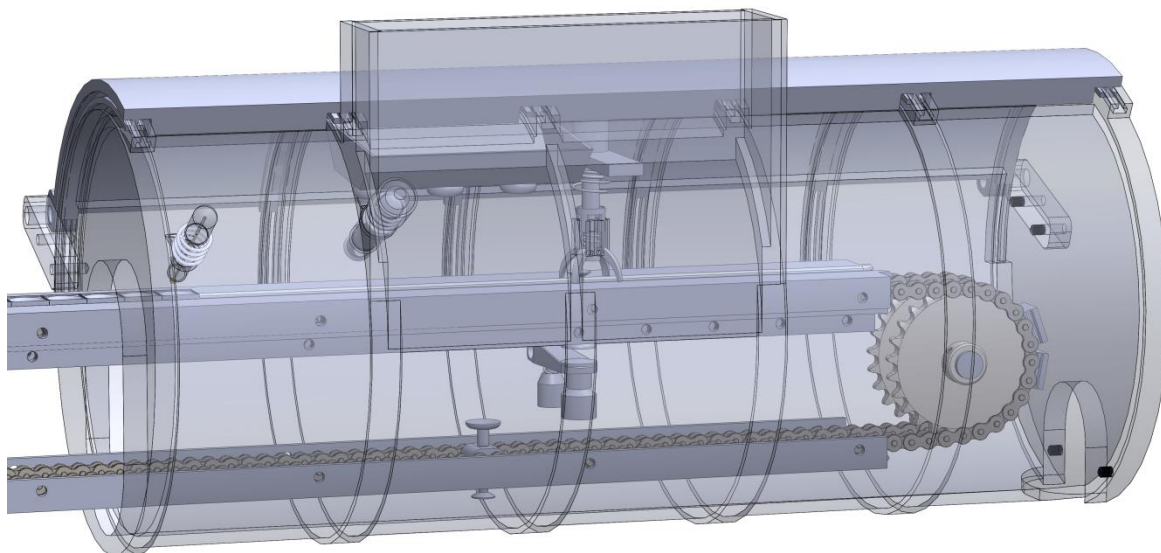


Figura 4.2 Escudo de protecção

Note-se também como os componentes eléctricos e mecânicos estão colocados no topo ou no meio, longe das zonas onde se pode realizar acumulação de resíduos, e que as aberturas da caixa estão direccionadas para lados em que não pode estar presente qualquer pessoa durante a operação da máquina, respeitando o objectivo principal e secundário dos sistemas de protecção anteriormente definido.

Numa primeira análise que pode ser consultada no anexo A, estima-se que o invólucro resiste a uma pressão uniforme de 2,8 bar sem ocorrer cedência, e uma pressão de 6,5 bar antes de ocorrer rotura do material.

A pressão máxima estimada para a onda de choque é de 29,7 bar, mas a pequena quantidade de material presente leva a que a onda de choque chegue a pressões inferiores a 2 bar num raio de 20 mm, pelo que quaisquer estragos deverão ser limitados. Mesmo que ocorra rotura, esta tende a ocorrer numa zona afastada do operador.

A limpeza do aparelho é fácil, pois a porta tem um bom acesso pela via superior, e aberturas dos lados estão em contacto com o fundo da protecção do explosivo, permitindo a sua limpeza.

Os aparelhos eléctricos estão localizados no topo e no centro do invólucro, longe de zonas onde é possível de se acumularem poeiras, e são protegidos do sobreaquecimento por sensores de temperatura colocados em lugares estratégicos.

5. Proposta de automação

5.1. Decomposição do processo manual

A obtenção de qualquer produto de forma automática é apenas limitado pelo tipo de ferramentas e automatismos disponível, existindo um número elevado de estratégias ou passos diferentes que possam ser escolhidos para chegar a um mesmo resultado final.

As limitações adoptadas a nível de projecto centram-se em requisitos de segurança, qualidade, cadência e flexibilidade de produção (entenda-se este último como sendo a capacidade de produzir produtos diferentes com a mesma máquina) que é necessário observar, procurando-se obter um sistema o mais simples possível de forma a maximizar a fiabilidade, minimizar o custo inicial e custo de fim de vida da máquina.

No projecto alvo da tese, não foi requisitado qualquer tipo de flexibilidade de produção, a cadência de produção é baixa e os requisitos de qualidade e segurança são elevados. A satisfação desses requisitos foi feita recorrendo a uma máquina de duas linhas de montagem em série, tendo sido feita a seguinte decomposição do processo manual:

Tendo em vista a obtenção de uma fila linear de quadrados regulares adequada para ser transportada numa correia linear, a fase **1** é subdividida nas seguintes fases:

- 1.a)** alimentação de uma folha de papel de seda segundo uma trajectória linear,
- 1.b)** corte a intervalos regulares da folha de papel de seda recorrendo a uma punção.

A fase **2** do processo manual não é necessário subdividir, pois a vincagem de cada quadrado pode ser obtida recorrendo a uma simples prensagem no molde adequado.

As fases **3** e **4** do processo manual não requerem subdivisão, podendo a deposição de AgCNO ou de areia grossa no quadrado de papel ser sendo feitas recorrendo a pistões calibrados.

A fase **5** do processo manual é subdividida nas seguintes fases:

- 5.a)** Utilização de uma garra mecânica de 4 extremidades para levantar as 4 arestas do papel de seda vincado
- 5.b)** Rotação do suporte inferior do estalinho, resultando na torção do papel vincado, obtendo-se assim um estalinho individual fechado.

Neste último passo, caso haja rompimento do papel de seda e consequentemente não esteja garantido o selo do conteúdo, não é previsto qualquer tipo de separação mecânica. Se o número de rompimentos/erros for excessivo, a produção pára e é necessário um trabalhador fazer verificações, caso contrário o processo continua até que estejam completos o número de estalinhos necessários.

A fase 5 é seguida da fase 6, em que entra em funcionamento a 2ª linha de montagem. As fases passam a ser as seguintes:

6.a) Introdução manual de uma caixa aberta de cartão canelado

6.b) Introdução de duas hastes finas no saco de papel grosso, procedendo-se à sua abertura e deposição do saco na vertical dentro da respectiva caixa de cartão canelado, previamente aberta.

6.c) Alimentação de porção de serradura dentro do saco por um tempo previamente definido, sendo retiradas as hastes finas

6.d) Deposição dos 48 estalinhos dentro do saco de cartão canelado (convergência com a fase 5)

6.e) Recolha da caixa pelo trabalhador, que verifica o conteúdo, dobra o papel de cartão e fecha a caixa de cartão canelado.

Recorrendo a este tipo de subdivisão, torna-se aparente um desequilíbrio importante em termos de tempos de fases. Efectivamente o tempo de execução da fase **6.d)** tem de ser pelo menos 48 vezes maior que os tempos de execução das fases **2.a)** a **5.c)**, razão pela qual se tornou necessário recorrer a uma linha de montagem separada.

Uma solução utilizada numa máquina pré-existente é a de criar diversas linhas de montagem em paralelo para as fases 2.a) a 5.c), convergindo os produtos em simultâneo num único saco, assim obtendo um equilíbrio maior de tempos de execução. Essa solução não foi adoptada por não ser considerada necessária dada a baixa cadência de produção pretendida, não justificando os custos acrescidos.

Por outro lado, seria possível aumentar o nível de automação e obter uma caixa de estalinhos completa, através da adição de tarefas que integrassem a fase 7 e 8 do processo manual, nomeadamente:

1. Agitação suave do conjunto
2. Encosto de uma haste fina à abertura do saco de papel grosso, seguida da dobragem da extremidade do saco através do deslocamento lateral pela extremidade oposta de uma superfície em L.
3. Reposicionamento do saco de papel grosso na horizontal por acção do deslocamento da superfície em L do topo.
4. Fecho da tampa da caixa de cartão canelado por rotação de uma superfície de topo, estando assim obtida uma unidade completa.

Esta opção não foi seguida, pois se por um lado não é claro como são fornecidas as caixas de cartão canelado, sendo provável que teriam de ser colocadas na linha de montagem por outra máquina, por outro lado também representa um nível de complexidade adicional desnecessário, pois nem o ritmo de produção nem a qualidade dos sensores é suficiente para se poder garantir o controlo de qualidade sem inspeção por parte de um trabalhador.

O esquema geral da máquina realizada está apresentado na figura 5.1, estando assinalados com rectângulos as fases executadas nas respectivas zonas. À esquerda está colocada uma figura humana de 1,66 metros de altura para efeitos de escala:

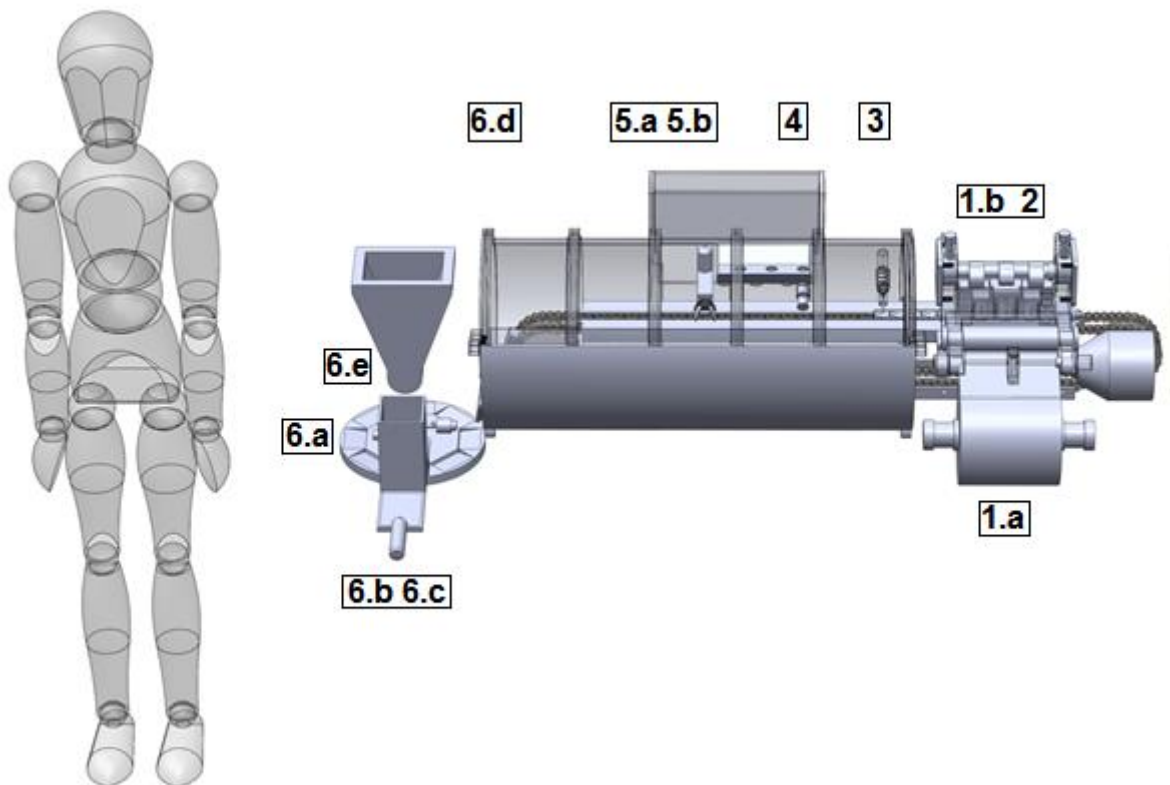


Figura 5.1. Esquema 3d da máquina de processo automático

Este novo processo de produção automatizado foi assim concebido para que o produto final seja idêntico ao produto obtido pelo processo manual, usando os mesmos componentes. Por razões de lógica de produção industrial, é frequente estes componentes serem alterados de forma a simplificar o processo produtivo.

Um exemplo de como isto se poderia aplicar no caso específico em estudo, seria o de substituir as folhas de papel de seda por sacos pequenos de termoplástico, cujo selo pode ser feito por aquecimento rápido das extremidades em vez de depender de um sistema complexo de dobras.

Esta simples alteração teoricamente permitiria obter ritmos maiores de produção para um custo menor de fabrico, mas está sujeita a outros riscos. No entanto estes e outros métodos semelhantes não foram objecto de estudo no âmbito desta tese pois se por um lado uma alteração de componentes implica uma alteração de fornecedores, por outro lado o produto final obtido já seria diferente do anterior, podendo existir consequências em termos de aceitação do novo produto.

5.2. Características do mecanismo

A modelação do mecanismo foi feita recorrendo ao software solidworks 3D, incluindo tanto o modelo geométrico como a simulação de movimentos no sistema, onde aplicável. O modelo final é constituído por 489 peças distintas, apresentando-se o aspecto geral na seguinte figura 5.2:

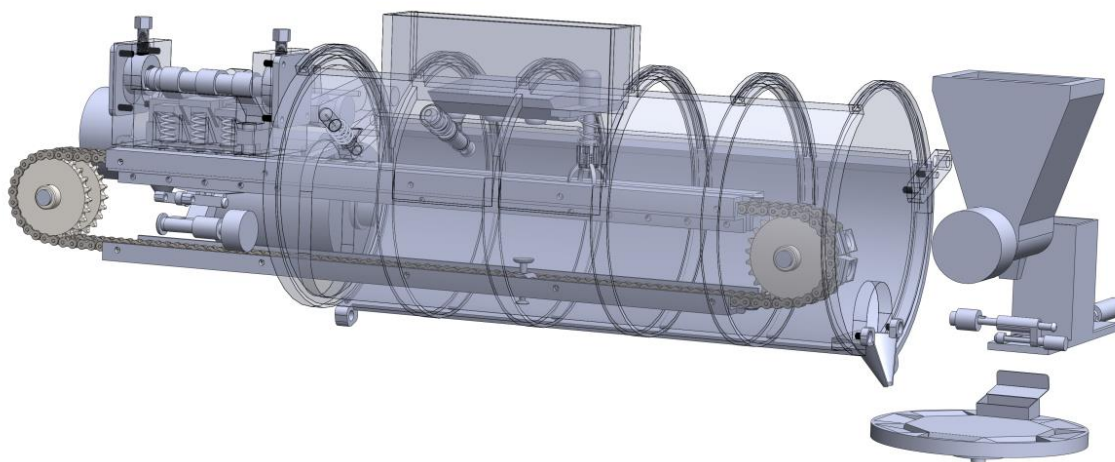


Figura 5.2. Modelo 3D

As dimensões do mecanismo são relativamente compactas, estando no total circunscrito a um rectângulo de 1,5 metros comprimento, por 1 metro de largura, e 0,5 m de altura. Foram utilizadas dimensões normalizadas em todo o modelo, incluindo peças como veios, cavilhas, casquilhos, parafusos, correntes, chapas, e molas, sendo que as dimensões destas últimas não estão necessariamente ajustadas aos esforços a que estão sujeitos, apesar desses esforços terem sido calculados.

As posições relativas de todos os componentes foram calculadas, e se a estrutura de apoio em si não foi modelada, estão previstos todos os pontos de apoio e espaços livres necessários à sua realização.

O modelo foi concebido para ser passível de construção, e não apenas possível no mundo virtual, tendo sido adoptado o princípio de usar o máximo de peças comuns dentro do conjunto.

Como exemplo, note-se que tanto as guias plásticas da corrente como os suportes metálicos da parte superior (de comprimento 1 m) são simétricos tanto ao longo da secção, como transversal a esta, permitindo que sejam usados em 4 posições diferentes. A vantagem disto é o de tornar possível uma distribuição do desgaste uniforme, bem como o de facilitar a sua substituição se for necessário.

A mesma simetria foi aplicada aos furos usados para a sua fixação, de tamanho M8. No caso das guias plásticas, são apenas necessários 5 furos de suporte dispostos a distâncias regulares, pois a sua única função é o de impedir as vibrações de deslocamentos laterais das formas.

No entanto, nada isto indica a característica essencial da máquina – a sua **modularidade**. Com efeito, a mesma máquina pode em teoria ser composta apenas pela corrente de transmissão, respectivas formas e escudo de protecção (pois representa parte da estrutura), formando a base do sistema de produção em série e aumentando a produtividade ao permitir que os trabalhadores realizem as suas tarefas especializadas nos seus postos respectivos.

A máquina pode então ser progressivamente montada adicionando diferentes módulos, progressivamente mecanizando as etapas do processo, aumentando o ritmo de produção e diminuindo o número de tarefas a serem realizadas por trabalhadores especializados.

Na verdade, este potencial evolutivo nem termina com a adopção do sistema automático tal como é apresentado, pois a máquina está concebida para adoptar o

funcionamento de 2, 3 ou 6 injectores de AgCNO, injectores de areia grossa, e enroladores em simultâneo numa só linha de montagem para aumentar o ritmo de produção, sem sequer ser necessário alterar o programa de controlo (usando o graficet apresentado para o esquema automático na figura 3.3 como exemplo, bastaria alterar o parâmetro w).

No limite, seria também possível colocar linhas de montagem a paralelo a alimentar uma única embalagem, o que atingiria um melhor equilíbrio da linha, mas para isso seria necessário fazer algumas alterações ao projecto, embora menores. O importante é que esta máquina pode ser adaptada a diversos utilizadores, conforme as necessidades.

Dada a complexidade do modelo, este de seguida vai ser analisado em secções mais pequenas.

5.3. Linha de montagem

O sistema de transporte da linha de montagem escolhido foi o de corrente dupla, sistema que não requer muita manutenção nem grande investimento inicial pois para as pequenas dimensões do sistema torna-se possível dispensar de um sistema de rolos e utilizar um único motor eléctrico para imprimir movimento ao conjunto.

Ligados à corrente está um conjunto de formas em aço, em cima das quais é preparado cada estalinho por diversas etapas. As formas servem de base de apoio para a corrente, sendo restringidas no movimento lateral e vertical por guias plásticas nas quais deslizam, e apoiadas na parte inferior por suportes metálicos.

Em relação à corrente e aos carretos, estes também foram modelados de acordo com as dimensões padrão, tendo o passo de 15,9 mm (norma ISO 10 b) sido escolhido para que se pudesse colocar uma forma de papel com 31,5 mm de lado dentro de cada dois elos. Isto permite que a união entre as formas e as correntes seja feita por um prolongamento simples de elos, em vez de ter de recorrer a peças de ligação especializadas.

A consequência do passo escolhido acaba por ser um ligeiro sobredimensionamento da corrente, como foi possível verificar através do método de cálculo empregue pela Renold, com detalhes fornecidos no anexo C.

Os carretos escolhidos são carretos padrão de 25 dentes, número suficiente para reduzir o desgaste e fornecer espaço suficiente para o motor eléctrico do sistema de enrolamento. Como o diâmetro nominal é de 126,7 mm o binário do motor eléctrico mínimo para uma força pretendida de 441,5 N é de 28 N/m.

Mesmo não estando modelado, o ajuste da pré-tensão da corrente é efectuada no carreto do lado da prensa, sendo recomendada uma pré-tensão de pelo menos 30 N para vencer o atrito das peças a deslocar-se na parte inferior.

A forma do papel, representada à direita da figura 5.3 em baixo tem de dimensões 31,5 mm de lado e 31 mm de altura, para uma massa total (estimada pelo solidworks) de 23 g. Os furos de ligação entre elos têm cerca de 5 mm, estando previstos que a tolerância destes comporte o desgaste previsível da corrente.

Note-se também na figura 5.3 como as extremidades das guias plásticas estão inclinadas a fim de permitir a entrada das formas mesmo que existam desalinhamentos, tendo sido escolhido um perfil triangular de secção a fim de minimizar os deslocamentos laterais causados ao longo da forma.

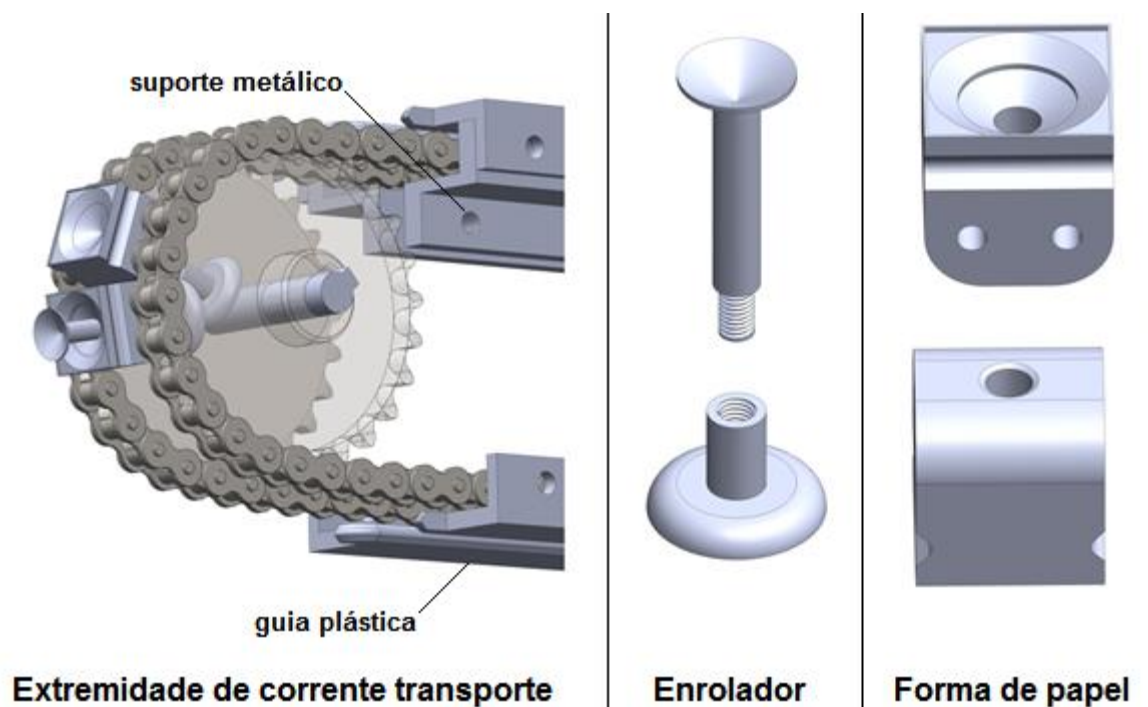


Figura 5.3 Detalhes da forma e transmissão

O diâmetro interior do enrolador é de 8 mm e está ligado a uma rosca tipo M6 de 10 mm de comprimento, que faz a ligação à parte inferior, que tem 10 mm de diâmetro e 16 mm de altura em relação à base, que tem 30 mm de diâmetro e 20 mm de altura.

O conjunto completo pesa cerca de 6 g, pelo que não tem grandes efeitos dinâmicos – mas restringe bastante o espaço disponível à cinemática. Entre outras limitações, obriga a que o diâmetro do veio de ligação entre elos se restrinja a 16 mm, incluindo uma chaveta padronizada de 8 mm de largura, pelo que se recomenda que o veio seja de uma só peça por uma questão de resistência.

O facto de o enrolador estar localizado na parte interior da curva podia também implicar que devido à redução do diâmetro os diferentes enroladores chocassem entre si. Em princípio, o deslocamento dos enroladores permite que se arranjam de forma e existir espaço ao longo da curva, mas seria preciso testar um modelo real para confirmar o efeito.

No caso dos suportes metálicos, estes têm que resistir eficazmente aos esforços verticais a que as formas estão sujeitas, em particular na fase da prensagem, pelo que estão previstos furos de parafusos adicionais para distribuir a carga na extremidade. Os furos nos suportes metálicos (de espessura 10 mm) são roscados visto que não há espaço para colocar porcas ou cabeças de parafusos entre estes.

5.4. Sistema de admissão de papel

O processo produtivo é iniciado com a entrada de papel de seda na forma de rolos contínuos em que a extremidade é introduzida pelo operador, e o desenrolamento é feito através dos rolos no centro da figura 5.4:

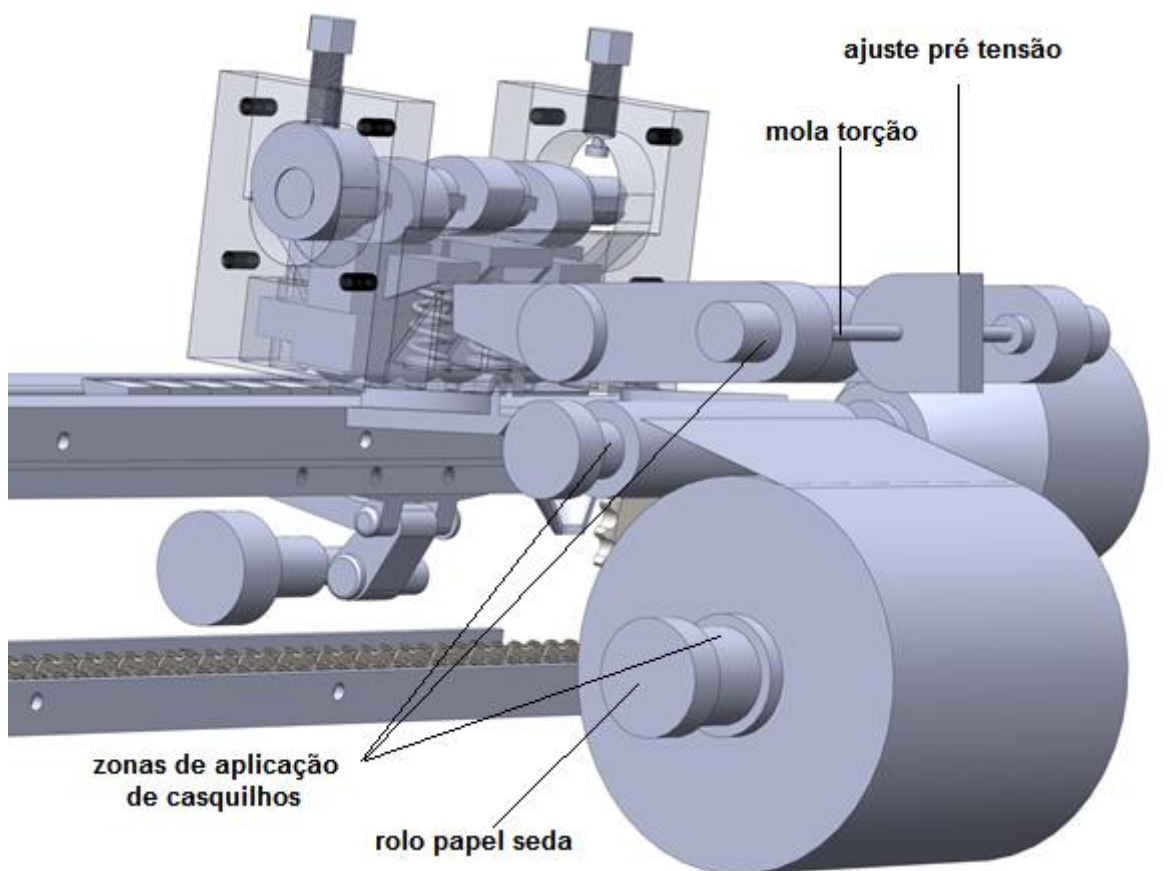


Figura 5.4 Sistema admissão papel

O rolo superior rola livremente, e é mantido em contacto com os rolos inferiores por pressão da mola de torção das extremidades sobre os braços oscilantes de suporte. A tensão da mola é ajustável por um parafuso ligado a um carreto no centro da mola de torção.

O rolo inferior é fixo mas motorizado, com a sua rotação fornecida por um motor eléctrico rotativo contínuo e transmissão directa por veio com cavilha. Os casquilhos têm de diâmetro 30 mm, e 10 mm de largura.

A admissão de papel é feita com uma ligeira inclinação descendente, e é interrompida quando este atinge um sensor colocado na parte traseira da prensa. Quando esse sensor está activado, e 6 formas de papel estão prontas para prensagem, é accionado o mecanismo de bloqueio das formas, assegurando que estas encontram-se na posição correcta irrespectivamente do estado de desgaste da corrente. O mecanismo está descrito na figura 5.5:

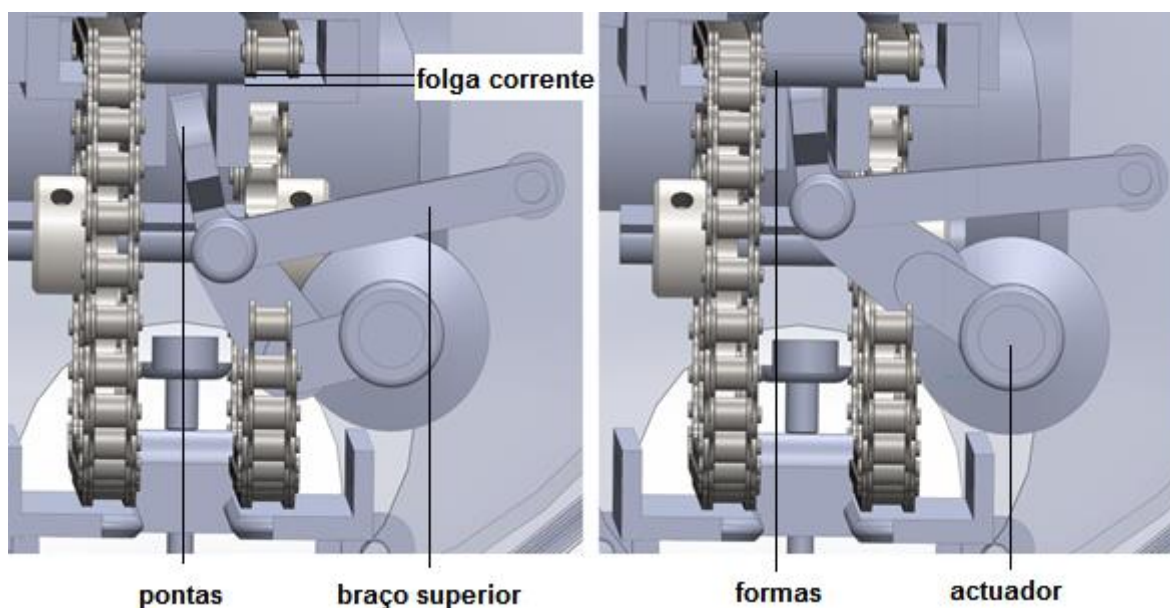


Figura 5.5 Sistema de prisão

No lado esquerdo da figura, a peça já está a meio do movimento, sendo esse o momento a partir do qual as pontas do braço superior (de 95 mm de comprimento) entram em contacto com as extremidades inferiores do conjunto de 6 formas. No lado direito da figura 5.5, as formas já estão bloqueadas e a distância entre cada uma delas reduzida a nada, estão perfeitamente alinhadas com os moldes.

A biela tem de comprimento 36 mm entre eixos, comparado com um comprimento entre eixos de braço inferior de 30 milímetros. O curso disponível de 50

milímetros permite recuar o braço superior o suficiente para permitir a passagem dos enroladores, enquanto a não linearidade própria de um sistema biela manivela desta geometria permite que o motor rotativo exerça bastante força no limite superior do curso.

Note-se também, que a localização dos furos dentro da forma é tal que a corrente não chega a entrar em contacto com o suporte metálico, minimizando o desgaste desta. Após ter sido realizada a prensagem, resta uma rede de papel fina que é expelida do outro lado da prensa, pelo movimento de entrada do papel.

Esta secção da máquina é a única que não está potencialmente sujeita a atmosferas explosivas, dado só ser aplicado o explosivo na fase seguinte. Logo não há normas específicas a aplicar nesta secção em particular, sendo, no entanto, tomadas precauções em relação à electricidade estática e à temperatura de superfície dos componentes.

5.5. Prensagem

Possivelmente o componente mais complexo desta máquina, o princípio de funcionamento de base desta é o da came, actuando directamente pistões deslizantes. Uma vista “explodida” da máquina com uma identificação das peças é fornecida no apêndice A, junto com algumas dimensões mais relevantes.

A primeira peça a contactar com o papel está ligada à came central, sendo visível à esquerda na figura 5.6 a diferença entre os ângulos de actuação.

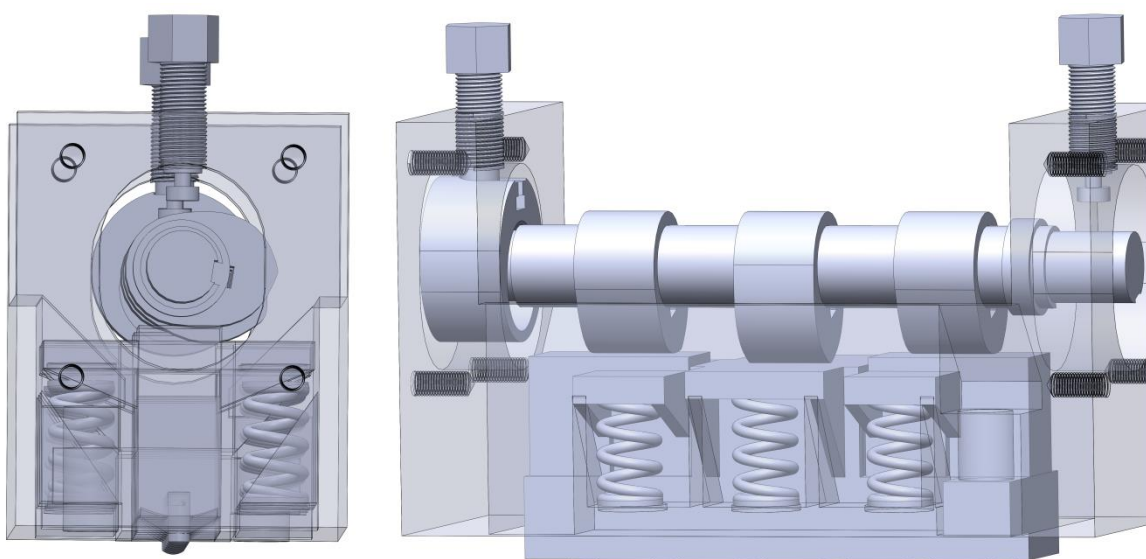


Figura 5.6 Início do movimento da prensa

Esta peça, designada de ferramenta de corte, tem a função de prender o papel uniformemente na superfície das formas, mantendo-o esticado durante a fase seguinte.

A flexibilidade das guias plásticas e do papel permite que esta prisão seja mantida mesmo quando o papel é comprimido com força pela peça ligada às cames laterais, sendo o papel cortado por efeito das bordas quadradas finas, num movimento semelhante a uma tesoura. Nesse momento, a base da forma já está em contacto com o suporte metálico, impedindo o movimento descendente.

As duas peças recuam simultaneamente, com a excepção do extractor colocado no centro das 6 superfícies (visível na figura 5.7 à direita) por estar ligado por uma mola flexível. Esse pequeno atraso é suficiente para assegurar que o papel não fica em contacto com a prensa após a compressão.

O desgaste das peças da came é compensado ao rodar os parafusos de topo, que suportam as caixas de rolamentos. As cames individuais estão ligados ao veio por meio de chavetas, e a sua distância relativa é mantida por espaçadores que só estão representados de forma esquemática.

As caixas de rolamentos não são iguais a fim de ser possível retirar o conjunto do veio da came completo simplesmente ao desparafusar as tampas laterais. O veio tem um diâmetro mais pequeno nas extremidades para que o rolamento esteja bem localizado.

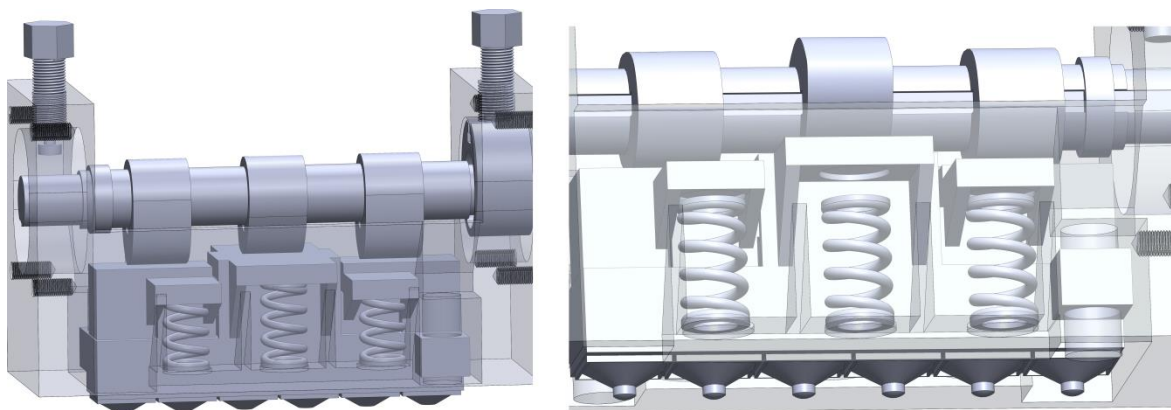


Figura 5.7 Fim do movimento prensa

5.6. Injecção de material

Para administrar uma quantidade específica de material repetidamente, não é prático medir a massa de cada dose individualmente. As densidades da areia e do fulminato de prata são conhecidas e constantes, pelo que calculou-se o volume de cada dose. As quantidades de material a injectar são muito pequenas, e o curso de um motor eléctrico

com retorno por mola pode variar significativamente devido a muitos factores (instabilidade fonte eléctrica, degradação de bobine, desgaste pistão, entre outros), pelo que é necessária uma forma física de garantir um volume constante.

Pretende-se que apenas uma pequena parte da superfície do volume de controlo esteja sujeita a fricção, tanto para minimizar os erros de doseamento devido ao desgaste das peças bem como o risco de ocorrer uma explosão.

Optou-se por efectuar um furo cilíndrico dentro de um pistão pois o volume depositado depende apenas do volume do furo no pistão deslizante, e não do curso do solenóide que pode variar. Ao colocar o pistão com uma inclinação de 30° em relação à horizontal, evita-se que as partículas que entrem no espaço vazio entre o pistão e a manga de suporte se desloquem para dentro do mecanismo. Os furos são feitos na vertical, com o preenchimento e esvaziamento feito por gravidade. Na figura 5.8 estão expostas as posições extremas do curso do pistão de areia

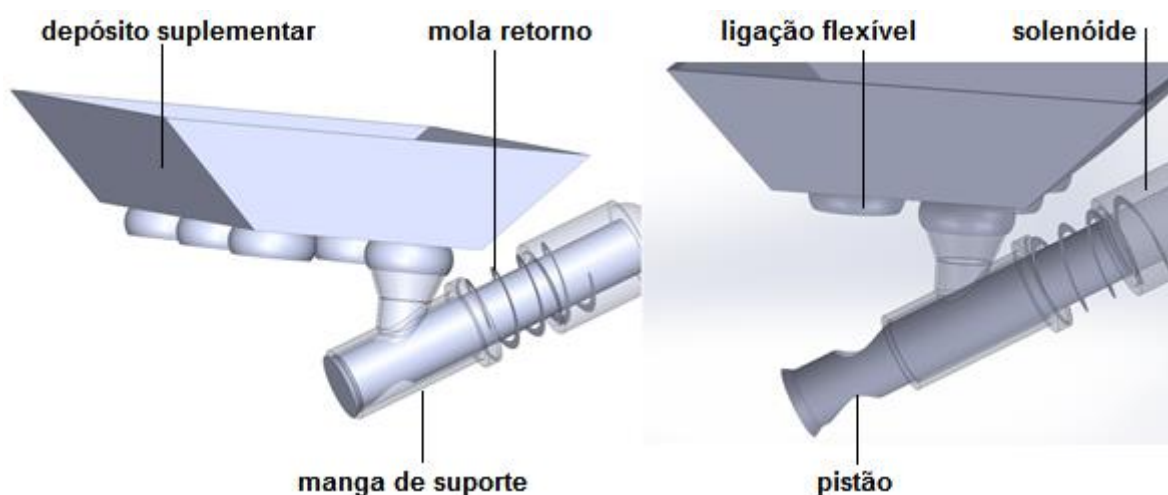


Figura 5.8 Movimento injetor areia grossa

As substâncias a injectar são armazenadas em depósitos cónicos alinhados sobre o furo quando este está completamente recuado, sendo o curso de retorno limitado pela extremidade que é tornada mais larga, e chanfrada a fim de minimizar concentrações de tensão. O ângulo de chanframento escolhido é de 30° em relação ao eixo do pistão, o que se traduz num ângulo de superfície cónica entre 0 de 60° em relação à horizontal. Tentamos, assim evitar as pequenas explosões que possam resultar da existência de pó acumulado na superfície cónica quando é atingido o limite de curso de retorno.

As mangas onde o pistão desliza estão posicionadas perto o suficiente da corrente de transporte para que qualquer resíduo que reste na superfície cónica seja

depositado para dentro do papel do estalinho. Embora os solenóides de actuação estejam rigidamente montados, as mangas em si têm apoios flexíveis para permitir uma ligeira vibração resultante do impacto do pistão na manga, que serve para facilitar a queda de material, por gravidade, do depósito cónico para dentro do furo do pistão.

A solução escolhida permite também o recondicionamento dos injectores, nomeadamente através da substituição de pistões por pistões de diâmetro maior e maquinagem da manga e do furo de acordo com o novo dimensionamento, maximizando o tempo de vida útil destes.

O maior volume de areia necessário por cada estalinho obriga à existência de um depósito adicional colocado a um nível superior, rigidamente montado à estrutura e ligado aos injectores por ligações flexíveis, caindo a areia simplesmente por gravidade.

Embora o mecanismo de injeção de areia e de AgCNO sejam semelhantes, as suas especificidades impedem que as peças sejam completamente intermutáveis. Em particular, o dimensionamento dos injectores de agCNO é substancialmente diferente, como o comprova a figura 5.9:

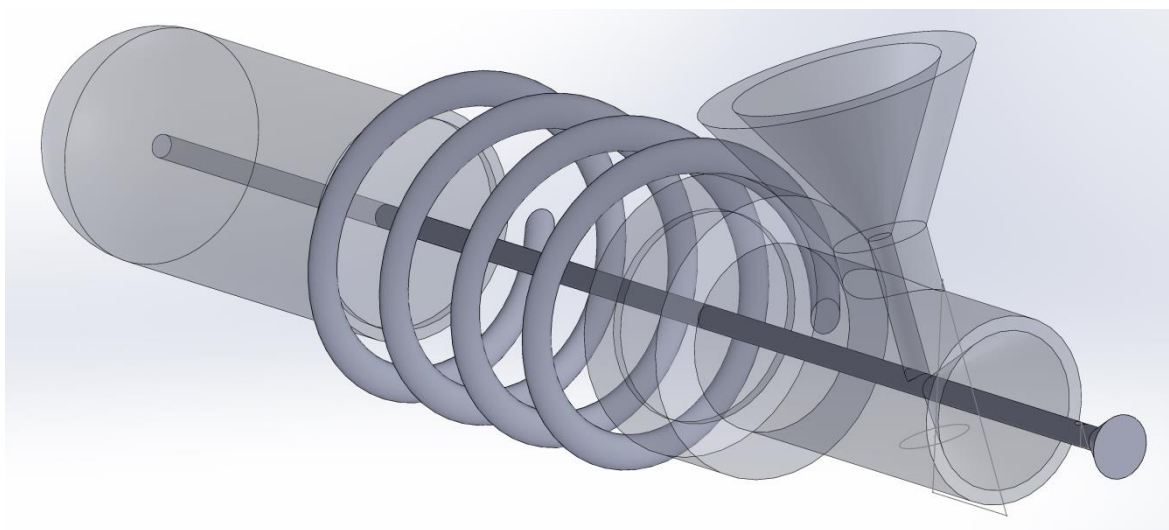


Figura 5.9 Detalhe do injector AgCNO

Tendo como referência as propriedades do fulminato de prata estudadas por Collins e Holloway [17], determina-se que o fulminato de prata usado como agente explosivo é moderadamente sensível ao impacto, consideravelmente sensível à fricção e extremamente sensível à electricidade estática, que o autor atribui à possível presença de partículas de prata que não foram consumidas nas reacções anteriores.

A partir dessas propriedades, definiu-se que o contacto directo com o explosivo deve ser realizada apenas por peças feitas de latão, pois este apresenta uma fricção baixa,

uma grande estabilidade química, uma condutividade eléctrica elevada (permitindo a descarga de electricidade estática através da terra) e um potencial eléctrico pela série triboeléctrica quase idêntico ao da prata, pelo que a geração de electricidade estática é minimizada.

Assim, a manga de suporte, o depósito cónico e o pistão do injector de AgCNO são feitos de latão, e as pequenas dimensões deste último obrigam a que seja previsto uma maior necessidade de acondicionamento. O problema é que para cada aumento de diâmetro de pistão, é necessário reduzir o diâmetro do furo para manter um volume constante de material, e o diâmetro de furo já é de si extremamente pequeno.

A solução deste problema passou por aumentar o diâmetro de saída dos depósitos cónicos. Assim, para diâmetros de pistão maiores torna-se possível realizar furos descentrados, que por serem relativamente mais curtos podem inclusive ser de igual diâmetro em relação aos furos originais.

O limite de velocidade de funcionamento dos injectores (determinado avaliando a aceleração máxima admissível e o curso percorrido) é muito superior ao necessário para a execução de cada passo, pelo que não constituem factor limitador. Salienta-se que o ponto de maior esforço realizado centra-se no momento de impacto entre o pistão e a manga que o rodeia no momento do recuo do pistão por efeito da mola. Mais detalhes técnicos encontram-se no apêndice B.

5.7. Enrolamento de estalinho

O enrolamento do estalinho é conseguido através de duas fases, que consistem na pega das pontas do papel na vertical efectuado por uma garra mecânica, e na rotação da base do papel em relação às pontas através de um veio colocado no centro da forma.

A garra mecânica é actuada apenas por um solenóide, sendo que o movimento de cada 1 das 4 pontas da garra tem 2 graus de liberdade, horizontal e vertical (justapostos no lado esquerdo da figura 5.10).

O movimento horizontal é aproximado por um movimento rotativo em relação aos apoios das pontas, sendo que esse movimento é iniciado pelo movimento vertical relativo entre o pistão ligado ao solenóide e a peça cruciforme onde são apoiadas as pontas das garras.

Esse movimento linear relativo é transformado em movimento circular pelo contacto entre a extremidade interior da ponta e o pistão, funcionando como uma alavanca em relação ao apoio das pontas, como é visível no lado direito da figura 5.11.

Na figura 5.10 estão ilustradas a posição inicial e final do enrolador, à esquerda e à direita respectivamente.

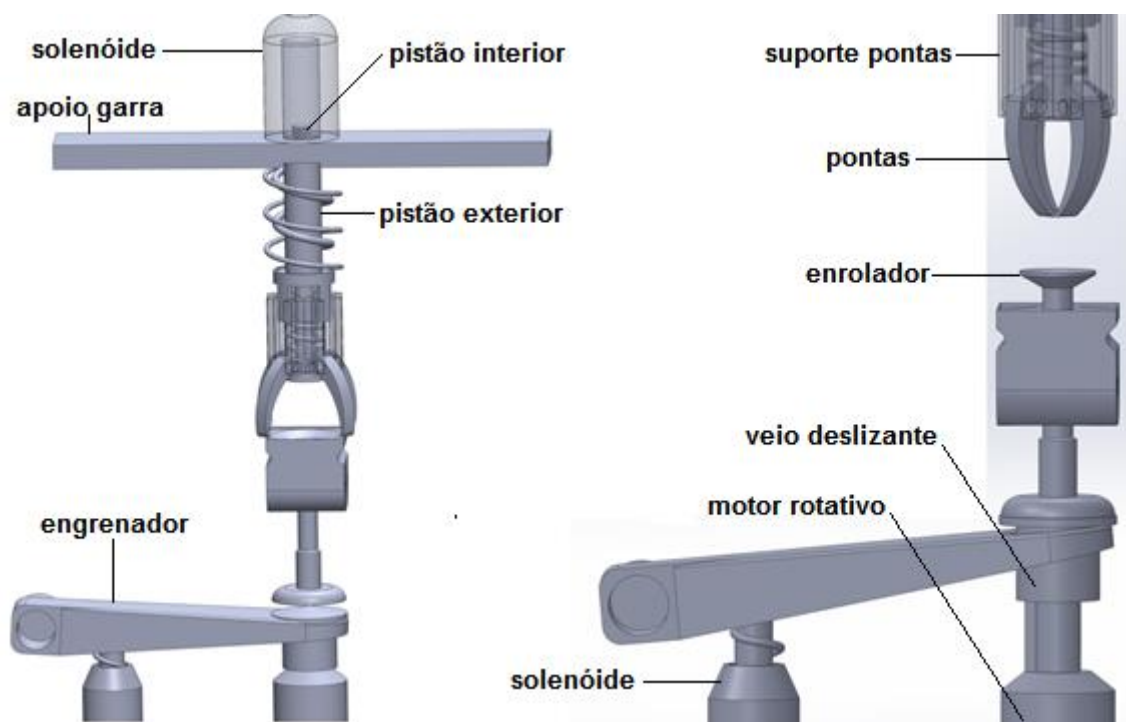


Figura 5.10 Posições extremas do enrolador

O contacto das extremidades interiores com o pistão tem uma componente deslizante, pelo que o desgaste da peça pode ser significativo se as forças dinâmicas de aceleração forem muito elevadas a fim de se obterem ritmos de produção elevados.

O desgaste destas extremidades inferiores pode ter como consequência uma folga entre o pistão e as pontas, resultando num movimento descontrolado durante o retorno da garra mas não durante o aperto, em que a força de aperto assegura o contacto. A tensão máxima durante o movimento do conjunto da garra é atingida nas pontas, nomeadamente na região em torno do apoio destas, como pode ser visto no apêndice C.

O movimento vertical é obtido pelo movimento conjunto do pistão e da peça de suporte das pontas das garras, que é ilustrado na parte central da figura 5.11, sendo que o curso necessário é muito superior ao curso do movimento vertical.

Para que o movimento seja coordenado, existe 1 mola (A) que faz a ligação entre o pistão e peça de suporte das pontas que é significativamente mais rígida que a mola

(B) que faz a ligação entre a peça de suporte e o apoio do solenóide. Assim, o equilíbrio de forças entre as duas molas assegura a diferença de deslocamentos necessária. Uma terceira mola (C) faz a ligação entre o pistão e o apoio do solenóide, compensando as forças de pré-tensão das molas anteriores bem como o peso próprio do conjunto.

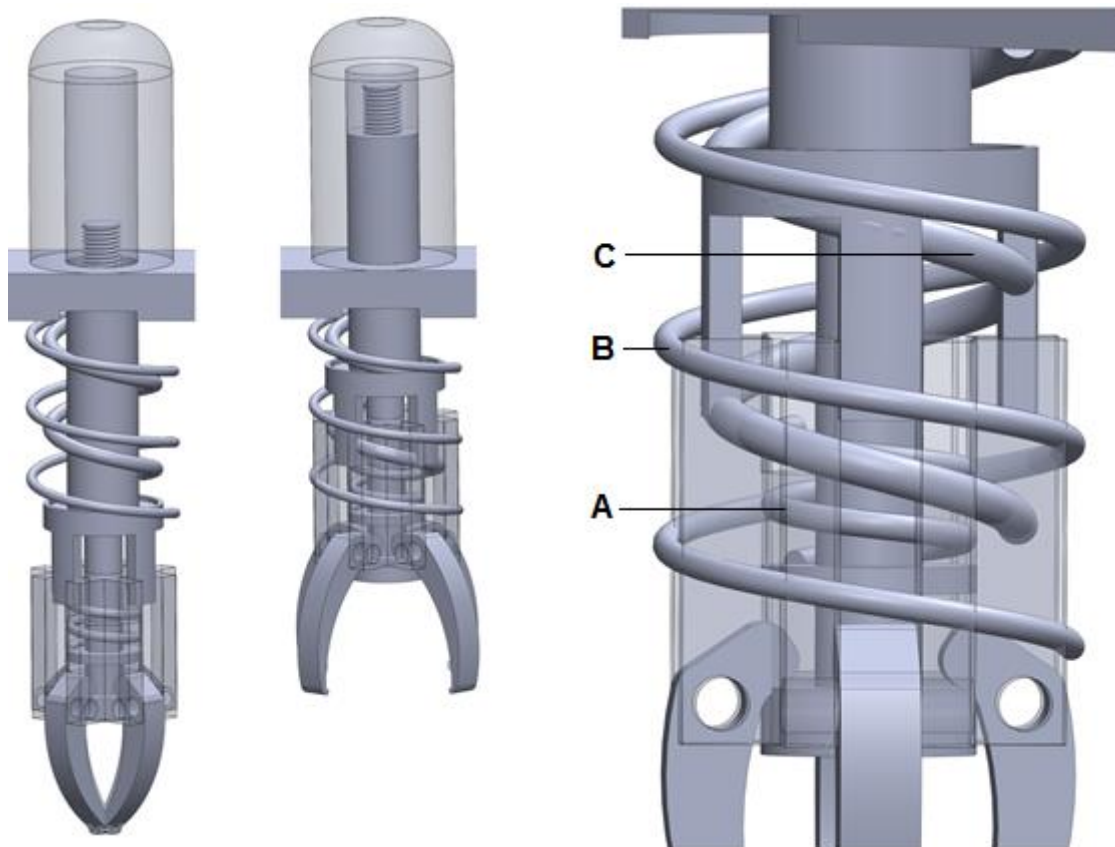


Figura 5.11 Movimento garra mecânica

O deslizamento da peça de suporte das pontas (exposto em detalhe no apêndice C) é restringido a um grau de liberdade por 4 barras que formam parte do pistão, que para efeitos de montagem é constituído por duas peças unidas na extremidade superior por uma porca autotravante. Esta união só é eficaz se as duas peças estiverem em compressão entre si, levando a que a mola A esteja a actuar em compressão e a mola C em tracção, o que obriga a mola B a actuar em compressão.

A desmontagem do conjunto pode ser realizada ao desmontar o pistão do solenóide e as pontas do suporte respectivo, sendo que ao desapertar a porca o pistão separa-se em dois e torna-se possível separar o suporte das pontas do pistão. Nas figuras não está representado que as pontas da garra têm acrescentos de borracha para facilitar a captura das pontas do papel.

A vantagem de ter elementos flexíveis a coordenar o movimento é o facto de este variar com a força aplicada nas pontas. Assim, torna-se possível que após o

movimento horizontal atinga o seu limite (ficando as quatro pontas presas) o movimento vertical continue assegurando que o estalinho esteja fechado antes de ser levantando completamente da forma.

Nessa altura entra em acção a segunda fase do enrolador, em que o veio situado na forma é colocado a rodar por acção de um motor eléctrico, que actua através de veio enchavetado ligado a um veio estriado deslizante, que contacta o veio da forma através do movimento do braço que lhe serve de suporte.

A extremidade superior do veio estriado consiste numa superfície cónica com um ângulo de 10° em relação ao plano horizontal, que corresponde à superfície inferior do veio da forma e a esta imprime movimento rotativo por fricção. Foi escolhido uma superfície cónica de contacto a fim de que quaisquer desalinhamentos entre o veio deslizante e o veio da forma causem o mínimo de oscilação, tendo um efeito autocentrador.

O apoio do veio estriado tem o formato de uma frecha circular de 26 mm de comprimento e 23 mm de largura, necessário para compensar as diferenças cinemáticas entre o movimento vertical do veio deslizante e o movimento rotativo do braço de apoio.

A fricção entre o veio deslizante e o veio das formas bem como o braço de apoio resulta num desgaste significativo das peças, que tem de ser compensado para manter as tolerâncias de movimento correctas. Compensar o desgaste através de simples ajustes do limite de curso teria como consequência ser necessário procedimentos de manutenção fastidiosos, pelo que optou-se por um sistema em que o curso é limitado pela força exercida nos braços.

Para tal, aumentou-se a vantagem mecânica entre o ponto de contacto do veio e o ponto de contacto do solenóide que actua o braço, multiplicando a força que o solenóide tem de exercer por 5,5. O peso do braço, do veio deslizante e do veio da forma são conhecidos, pelo que o braço entra em equilíbrio quando a força em excesso exercida pelo solenóide corresponde a cerca de 5 vezes o peso de um estalinho ($\approx 0,06$ N), o suficiente para exercer fricção no estalinho sem o levantar.

Como o desgaste das peças vai-se traduzir numa ligeira diminuição do peso do conjunto, e conseqüente maior força exercida no estalinho, esse efeito pode ser compensado por o efeito de uma pequena mola em tracção que exerce uma força adicional à medida que o deslocamento aumenta, e cuja pré tensão pode ser usada como afinação inicial do sistema.

Ao ser accionado o braço, o veio da forma entra em rotação e desloca-se para cima, contactando o papel do estalinho e torcendo a base em relação às pontas. Um sensor de rotação determina quando a torção é considerada suficiente para que o estalinho esteja fechado (torção excessiva poderia resultar no rompimento do papel), sendo que nessa altura o braço volta à posição original, o veio deixa de rodar e volta à posição original e a garra mecânica pode largar as pontas do estalinho completamente formado em cima da forma, pronto para a etapa seguinte.

5.8. Empacotamento

Cada grupo de estalinhos é depositado para dentro de uma embalagem de papel grosso, fornecido sob a forma de cartucho. Esses cartuchos podem ser colocados sobrepostos na horizontal dentro de uma caixa rectangular, que no fundo contém uma placa deslizante que faz a alimentação de papel grosso.

Essa placa deslizante tem um comprimento de 200 mm, um 1 mm de espessura ao longo da primeira metade e 2 mm de espessura ao longo da segunda metade, e é impulsionado por um veio de 8 mm de diâmetro, deslocando-se 100 mm na horizontal dentro de uma frecha de 2 mm, como é visível na figura 5.12, em baixo.

Assim apoiado, o cartucho individual no fundo da caixa desliza para fora da caixa de armazenamento, sem que o cartucho em cima deste consiga atravessar a frecha.

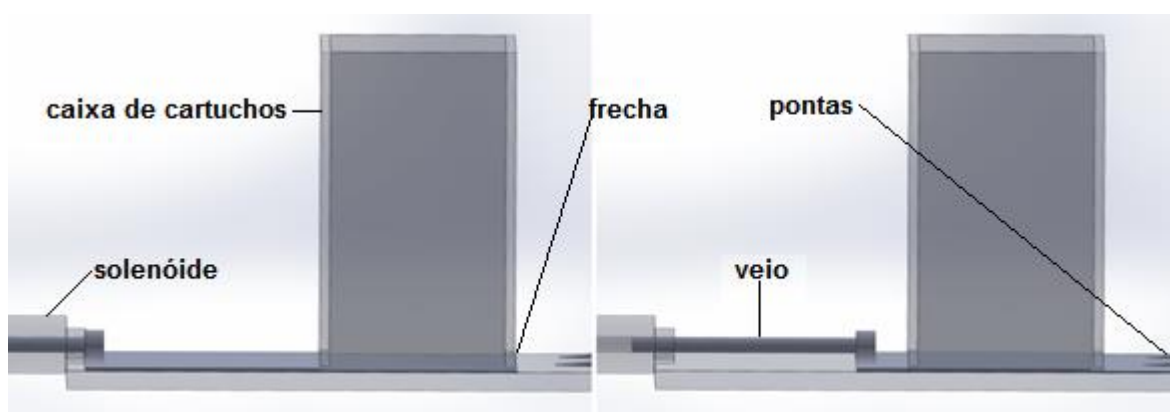


Figura 5.12 Alimentador de papel grosso

O cartucho extraído da caixa é encaminhado para duas pontas metálicas de 70 mm de comprimento, posicionadas para entrar ambas dentro do cartucho. Ao atingir o limite de curso, uma das pontas roda sobre um eixo móvel (diâmetro 8 mm) abrindo o cartucho, movimento esse representado no lado esquerdo da figura 5.13.

De seguida, o conjunto das pontas roda em torno de um eixo fixo (diâmetro 10 mm) mantendo a abertura das pontas, até que o saco papel grosso fique na vertical com a abertura para cima, pronto para receber a serradura.

Quando por baixo do saco de papel grosso está pronto uma embalagem de cartão canelado, o actuador do depósito de serradura roda 180° para que caia um volume de serradura calibrado (cerca de 3 cm³). A serradura é encaminhada por um funil para que passe entre as pontas sem se extraviar.

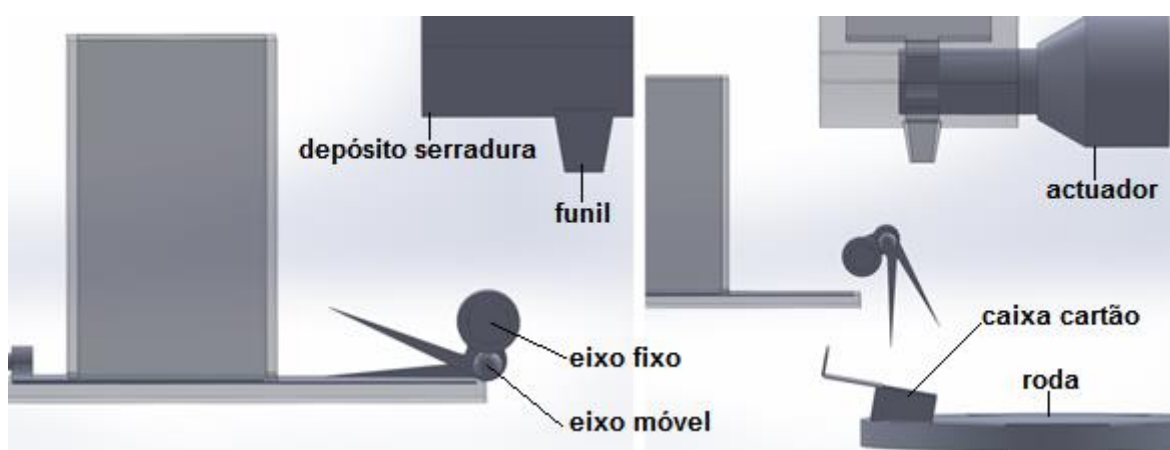


Figura 5.13 Deposição do papel grosso

O peso da serradura é suficiente para vencer a força de atrito entre as pontas e o saco de papel, que se deposita na caixa de cartão canelado colocado por baixo que acciona o sensor de pressão. É então que os motores das pontas são desligados e o conjunto retorna à posição inicial, sendo que é apenas nesse momento que o alimentador de cartão volta à posição inicial para evitar que no caso de a máquina ter interrompido o processo anormalmente se sobreponham muitos cartuchos de cartão.

Esse processo pode ser observado na figura 5.14, mas para que ocorra a fase seguinte é necessário que os outros dois processos sejam concluídos, nomeadamente o preenchimento do saco de papel com 48 estalinhos (ou outro número pré especificado) bem como a substituição por parte de um operador humano de uma caixa de cartão preenchida por uma caixa de cartão vazia.

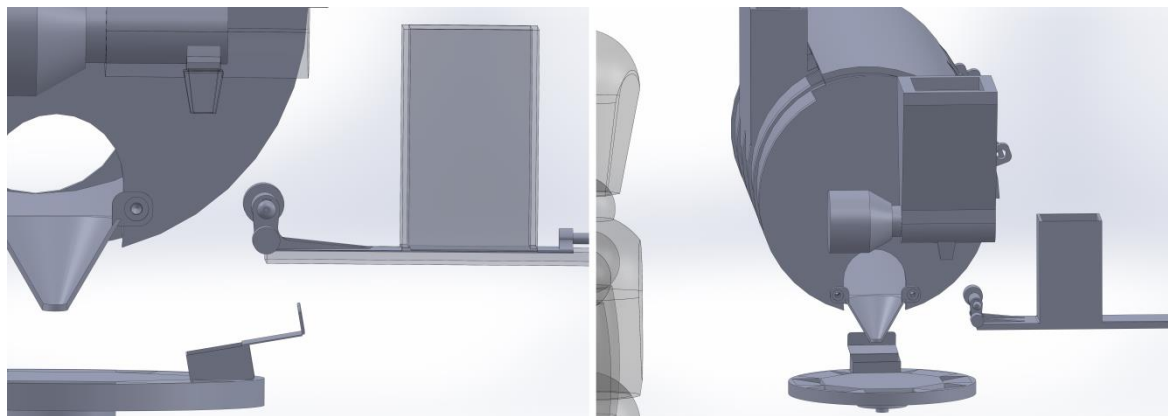


Figura 5.14 Fim do processo

A contagem do número de estalinhos é feita através de dois sensores, um o sensor de posição da corrente que faz a contagem de passagem das formas, e outro um sensor piezoelétrico pelos motivos já mencionados no capítulo 3.1.2. Admite-se que no caso de não existir uma correspondência entre os dados dos dois sensores que tenha ocorrido algum problema na máquina, e portanto seja necessário pará-la.

Por sua vez, o trabalhador que faz a substituição das caixas (assinalando com um botão que concluiu a tarefa) têm também a função de verificar o conteúdo para efeitos de controlo de qualidade, que se satisfeito é seguido de fecho do saco de papel e da caixa de cartão, ficando esta pronta para comercialização.

Estas tarefas podem ser realizadas em simultâneo porque as caixas de cartão deslocam-se em cima de uma roda com 300 mm de diâmetro e 20 mm de espessura, no qual estão colocados oito cavidades rectangulares onde se colocam as caixas.

Esta configuração permite que o trabalhador actue com o seu próprio ritmo, substituindo 1, 2, 3, 4 ou 5 caixas de uma só vez conforme for mais conveniente, que sejam colocados mais trabalhadores ou linhas de montagem em paralelo se for desejável, ou até que seja substituído o trabalhador por uma máquina capaz de selar a caixa de cartão canelado se tal for considerado vantajoso.

6. Análise económica

6.1. Descrição máquina pré existente

Actualmente os maiores produtores mundiais de estalinhos são a Coreia do Sul, o Brasil e a China, da ordem do menor para o maior. Procurou-se então uma máquina de referência que servisse de base de comparação para as soluções e escolhas conceptuais tomadas.

Tendo em conta as facilidades em termos legais e comerciais para negócios dentro da zona euro, o ideal seria encontrar uma máquina disponível no mercado europeu que servisse de base de comparação, no entanto, tal não foi possível encontrar.

É possível que se consiga obter uma máquina deste tipo por encomenda, mas como no resto do mundo existem modelos à venda anunciadas com preços e características técnicas anunciadas escolheu-se como base de comparação uma máquina proveniente da China.

O fabricante é a LilingCity YOYON Fireworks&FirecrackersFactory e os dados são disponibilizados no website de vendas online alibaba [18]. A sua montagem e funcionamento são demonstrados em vídeos publicados na internet que foram usados para a análise, e está disponível uma imagem da máquina no apêndice D.

6.1.1. Custos e produtividade

A máquina usada como referência baseia-se num sistema electropneumático, em que um autómato programável recolhe dados eléctricos de diversos sensores para definir, com base no seu programa, qual a electroválvula accionar a fim de permitir a passagem de pressão pneumática (vinda de um depósito de ar comprimido separado) que acciona os diferentes actuadores.

A máquina é concebida para poder ser desmontável e fácil de transportar, apesar de possuir um peso considerável de 640 kg. A potência eléctrica máxima necessária é de 1,5 kW, sendo compatível com fontes trifásicas ou monofásicas.

De acordo com o fabricante, a máquina completa (incluindo a máquina de corte de papel vendida em separado) tem um custo equivalente de 15 100 \$ ou o equivalente a 12 840 euros. Utilizando o simulador online da icontainers [20], foi possível estimar um custo de cerca de 800 € de transporte entre Shanghai e Barcelona, ao qual ainda devem ser adicionados custos de transporte terrestre e despesas alfandegárias.

A máquina tem um ritmo de produção entre 40 000 a 60 000 estalinhos por hora, o que significa um ritmo de produção de um estalinho por cada 90 a 60 milissegundos, um ritmo que a máquina alvo desta tese nunca poderia atingir.

Por outro lado, o facto de a máquina introduzir uma mistura pré feita de areia e fulminato de prata indica que o controlo de qualidade desta não é muito eficaz, pois com as concentrações de fulminato de prata tão baixas (2,5 mg por 5 g de areia) basta uma pequena variação na mistura para exceder os limites permissíveis por lei, bem como serem produzidos estalinhos sem explosivo suficiente.

O agrupamento de estalinhos dentro de um saco vazio corresponde a um factor de risco, pois mesmo cobertos com serradura para absorver as vibrações, nada impede que os estalinhos choquem entre si no saco, existindo um risco de explosão do produto final.

6.2. Comparação das diferentes soluções

Não foi feita uma simulação dinâmica dos mecanismos, mas assume-se que o tempo de realização das tarefas pode ser reduzido a 1 segundo ou inferior. O tempo de espera entre etapas foi calculado no anexo C, resultando um tempo de produção de cada estalinho passa a ser de 1,1 s por estalinho para o caso de um injector, ou de 0,2 segundos para o caso de 6 injectores.

Na prática para ambas as máquinas são necessários dois trabalhadores, um para fazer o empacotamento e um para reabastecer a matéria-prima em falta. A produção anual actual é de 12 000 embalagens por ano. Assumindo um custo de mão de obra de 1000€ por mês, em que cada mês tem 168 horas (8 horas de trabalho durante 21 dias) e em que todos os processos são empregues 2 trabalhadores, é possível comparar o custo de fabrico das diversas soluções:

	Tempo de fabrico[s]	Custo mão obra [€/ano]
Processo manual	2,75	5238€
Processo automático 1 injector	1,1	2095€
Processo automático 6 injectores	0,2	381€
Máquina referência.	0,06	114€

Tabela 6.1. Comparação de custo de mão-de-obra

O custo de mão de obra da máquina de referência parece bastante baixo, mas é preciso ter em conta o custo inicial, mais o custo de transporte. No mínimo, a opção pela máquina de referência implica a amortização de um custo inicial de 13 840€.

Fazendo a equivalência com o processo manual, seriam precisos quase 3 anos só para amortizar o custo inicial – e a esse valor é preciso adicionar os custos de manutenção e operação, que infelizmente não é possível estimar.

É possível então que a máquina conceptualizada seja melhor do ponto de vista económico que a máquina de referência, mas a este ponto do trabalho não existem dados suficientes para fazer essa afirmação.

7. Conclusões

7.1. Trabalho realizado

O trabalho realizado corresponde a uma possível solução para o problema que é a fabricação de estalinhos. A solução encontrada é de longe a mais segura das soluções comparadas, e é certo que a qualidade do produto realizado é superior.

Tendo em conta a construção da máquina, não seria difícil adaptá-la para ritmos de produção maiores ao simplesmente adoptar várias linhas de montagem em paralelo, mas por outro lado tal implica maiores custos iniciais e de manutenção, comparados com o projecto definido na tese.

Como demonstrado, no que respeita à produção automática estes custos representam uma parcela importante no total, sendo essa a razão pela qual a nível industrial estas soluções automáticas só são adoptadas para grandes níveis de produção.

Nesse sentido a construção modular permite que os custos iniciais da máquina sejam ainda menores, assumindo que a solução escolhida é suficientemente simples. Torna-se possível construir a máquina até ao ponto de sofisticação mais indicado para a procura actual, e realizar o investimento para aumentar as capacidades da máquina se existir procura que o justifique.

O produto obtido pela máquina projectada também corresponde aos padrões europeus de qualidade tal como especificados na lei, o que não corresponde ao caso do produto feito pela máquina usada como comparação.

Demonstrou-se também como a máquina pode também funcionar de forma semelhante recorrendo a um esquema electropneumático mais simples, sendo que principal diferença acaba por residir no limite à velocidade de produção máxima que é possível atingir, desvantagem potencialmente compensada pelo custo inicial menor do sistema de controlo.

Pode-se portanto, afirmar que os objectivos do trabalho propostos foram cumpridos.

7.2. Trabalho futuro

O projecto da máquina actual, embora seja suficiente para a construção de um protótipo, não é efectivamente um projecto mecânico completo em que estejam especificados todos os tratamentos de superfície, tratamentos térmicos, materiais e componentes a empregar.

Antes da realização de tal projecto, também seria desejável efectuar simulações do funcionamento real da máquina, sejam estas com protótipos físicos ou com análises dinâmicas computadorizadas. Por muito que a nível conceptual seja lógico que tudo funcione devidamente, a nível prático o mais provável é encontrar problemas que tenham de ser resolvidos antes de o projecto encontrado seja considerado válido, com soluções que podem variar dos pequenos ajustes a completas alterações de funcionamento.

O projecto assim realizado não é, sequer, o mais ideal. As peças foram concebidas para funcionarem, mas tal não significa que o processo seja óptimo; em muitos casos é possível aumentar a velocidade de execução, ou melhorar a fiabilidade, otimizar a resistência do escudo de explosão ou até encontrar soluções diferentes mas melhores para a execução das tarefas.

Como por exemplo, a solução do enrolador foi escolhida por ser aquela que tinha maiores probabilidades de funcionar. Um sistema muito mais simples que podia ter sido escolhido consiste na rotação simples da garra mecânica superior, mantendo o contacto com a forma, mas seria preciso fazer ensaios físicos para confirmar que o sistema fosse eficaz, e fiável.

Para a realização de um projecto mecânico completo, além da parte puramente mecânica também seria necessário realizar projectos de outros tipos como por exemplo o projecto térmico ou o projecto eléctrico, entre outros.

Enfim, espera-se que a presente dissertação sirva de inspiração a trabalhos futuros no âmbito de projectar e conceber soluções mecânicas para este, e mais problemas.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- [1] Administração interna. Decreto-Lei n.º 9/2017. Diário da República, 1.ª série — N.º 7 — 10 de janeiro de 2017
- [2] Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia. directiva 2013/29/UE do parlamento europeu e do conselho. Jornal Oficial da União Europeia – 28 de junho de 2013
- [3] NP. Artigos pirotécnicos; Fogos de artifício, Categorias 1, 2 e 3; Parte 4: Métodos de ensaio. 13 de Outubro de 2016
- [4] NP. Artigos pirotécnicos; Fogos de artifício, Categorias F1, F2 e F3; Parte 3: Requisitos mínimos de etiquetagem. 15 de Junho de 2017
- [5] NP. Artigos pirotécnicos; Fogos de artifício, categorias F1, F2 e F3; Parte 5: Requisitos para construção e desempenho. 15 de Abril de 2015
- [6] ISO. ISO 2859-1 :1999 Sampling procedures for inspection by attributes. Novembro de 1999.
- [7] J. Norberto Pires, Automação Industrial, ETEP – Edições Técnicas e Profissionais, Lidel, 2012 (5ª Edição).
- [8] IEC. IEC61131 Industrial-process measurement and control - Programmable controllers.2018 (actualizado)
- [9] Ministério da Economia. *Decreto-Lei n.º 111-C/2017 de 31 de agosto*. Diário da República, 1.ª série — N.º 168 — 31 de agosto de 2017
- [10] Ministério da segurança social e do trabalho. *Decreto-Lei n.º 236/2003 de 30 de Setembro*. Diário da República, 1.ª série — N.º 226 — 30 de setembro de 2003
- [11] Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia. *Directiva 2014/34/UE do parlamento europeu e do conselho*. Jornal Oficial da União Europeia. 29 de Março de 2014
- [12] Parlamento Europeu e o Conselho da União Europeia. *Directiva 1999/92/CE do parlamento europeu e do conselho*. Jornal Oficial da União Europeia. 28 de Janeiro de 2000
- [13] Comissão europeia. *Comunicação da Comissão no âmbito da execução da Diretiva 2014/34/UE do Parlamento Europeu e do Conselho relativa à harmonização da legislação dos Estados-Membros relativa a aparelhos e sistemas de proteção destinados a ser utilizados em atmosferas potencialmente explosivas*. Jornal Oficial da União Europeia. 15 de Junho de 2018.

[14] IEC. IEC 60079-0:2017 Explosive atmospheres - Part 0: Equipment - General requirements. 2017

[15] Indusmelec, Materiais e automatismos. Lda. “ATEX Atmosferas Explosivas”[online]http://www.indusmelec.pt/newsletter/11/ATEX-Atmosferas_Explosivas.pdf [consulta: 3 de Julho de 2018]

[16] IEC. IEC 60079 part 19, repair, overhaul and reclamation. 2006.

[17] P. H. Collins and K. J. Holloway. *A Reappraisal of Silver Fulminate as a Detonant, Propellants and Explosives* 3, página 159 a 162. 1978

[18] LilingCity YOYON Fireworks & Firecrackers Factory [Online]. <https://portuguese.alibaba.com/product-detail/wholesale-automatic-fireworks-pyrotechnics-machine-with-high-quality-60742712176.html?spm=a2700.7787047.0.0.wnQ5g2> [Consulta: 12 de Agosto de 2018]

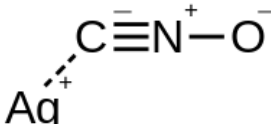
[19] fonte online <https://www.pinterest.com.au/pin/82331499418891191/> [Consulta: 14 de Agosto de 2018]

[20] icontainers [Online]. <https://www.icontainers.com> [Consulta: 8 de Setembro de 2018]

[21] fonte online https://pt.wikipedia.org/wiki/Fulminato_de_prata [Consulta: 20 de Fevereiro de 2018]

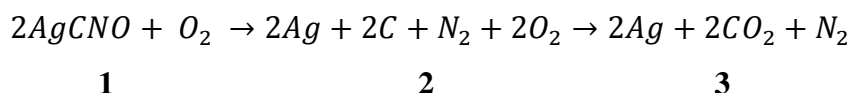
[22] NASA Glenn thermodynamic database [Online]. <https://www.grc.nasa.gov/WWW/CEAWeb/ceaThermoBuild.htm> [Consulta: 26 de Outubro de 2018]

ANEXO A – PROPRIEDADES FULMINATO PRATA

Fulminato de prata	
Alerta sobre risco à saúde	
	
Identificadores	Table 2. Sensitiveness Test Data for Silver Fulminate (Commercial)
Número CAS	5610-59-3 ↗
PubChem	62585 ↗
Propriedades	Impact (Rotter Test): Figure of Insensitiveness (F of I) = 22 (RDX = 80)
Fórmula molecular	AgCNO
Massa molar	149.885 g mol ⁻¹
Solubilidade em água	insolúvel (0,18 g·l ⁻¹ a 90 °C) [1]
Densidade	3,938 g/cm ³
Riscos associados	Temperature of Ignition (T of I): Exploded at 200 °C and 204 °C
Temperatura de auto-ignição	170 °C
Compostos relacionados	Electrostatic: metal/metal electrodes 0.04 μJ at 48 pF rubber/metal electrodes 0.3 μJ at 48 pF
Outros catiões	Fulminato de mercúrio (II)
	Ball and Disc: 14 cm 6/10 fires 13 cm 6/10 fires 12 cm 4/10 fires 11 cm 4/10 fires 10 cm 3/10 fires 9 cm 1/10 fires 8 cm 0/20 fires
	Friction (Emery Paper): 2.5 ft/s (~0.76 m/s) 7/10 fires 2.0 ft/s (~0.6 m/s) 5/10 fires 1.5 ft/s (~0.45 m/s) 0/10 fires

Dados da internet [21], excepto Tabela 2 [17].

Tratando-se de um explosivo, não estão disponíveis livremente informações sobre as suas características químicas como o poder calorífico superior ou inferior. Estas características foram então estimadas a partir da reacção química que se supõe que decorre numa explosão:



Uma simulação mais realista teria que levar em conta uma composição de produtos muito mais extensa que inclua moléculas mais raras como por exemplo Ag₂O ou NO_x e estabelecendo as quantidades relativas de moléculas pelas fórmulas do equilíbrio de gases, mas tal iria além dos objectivos do trabalho. O azoto que está naturalmente presente na atmosfera foi igualmente desprezado a fim do erro cometido ser por excesso (a temperatura de chama estimada vai ser maior que na realidade)

Para realizar os cálculos de temperatura de chama, recorreu-se ao programa NASA thermo build [22] para fornecer dados das espécies químicas relevantes. O programa não inclui informação referente ao fulminato de prata, pelo que se fez mais uma

aproximação e desprezou-se o passo 1 da reacção química, admitindo-se que apenas ocorre libertação de energia entre os passos 2 e 3.

Tratando-se de uma reacção explosiva, assumiu-se que esta é equivalente a um processo isocórico e adiabático, ou seja, em que não são realizadas trocas de energia através de calor e trabalho e que a energia interna dos produtos é igual à energia interna dos reagentes. A fórmula da energia interna de um gás perfeito é dada por:

$$U = (H - n \times R \times T)$$

Sendo H o produto da entalpia específica de cada espécie pelo número de moles, n o número de moles total, R a constante dos gases perfeitos e T a temperatura dos gases. Por um processo iterativo, chegou-se à conclusão que a temperatura de chama aproximada em que a energia interna dos reagentes e dos produtos está em equilíbrio é de 5350 K.

A pressão máxima da onda de choque foi novamente estimada recorrendo à equação dos gases perfeitos, comparando a pressão entre os reagentes e os produtos admitindo que o volume é constante:

$$V = \frac{n_R \times R_u \times T_R}{p_R} = \frac{n_P \times R_u \times T_P}{p_P}$$

Sabendo que na pior das hipóteses estão presentes no interior do escudo de explosão apenas cerca de 6000 mm³ de AgCNO, o que para uma densidade de 3.938 g/cm³ corresponde a cerca de 23 gramas de material explosivo, e que tipicamente a densidade de pó em depósito é cerca 50 a 60 % da densidade da substância, pode estimar-se que no máximo entrem em reacção 14 g ou 0,092 moles de AgCNO. O cálculo resume-se então:

$$n_R = \frac{3}{2} \times 0,092 \quad , \quad T_R = 300 \text{ K} \quad , \quad p_R = 1 \text{ bar} \quad , \quad n_P = \frac{5}{2} \times 0,092$$

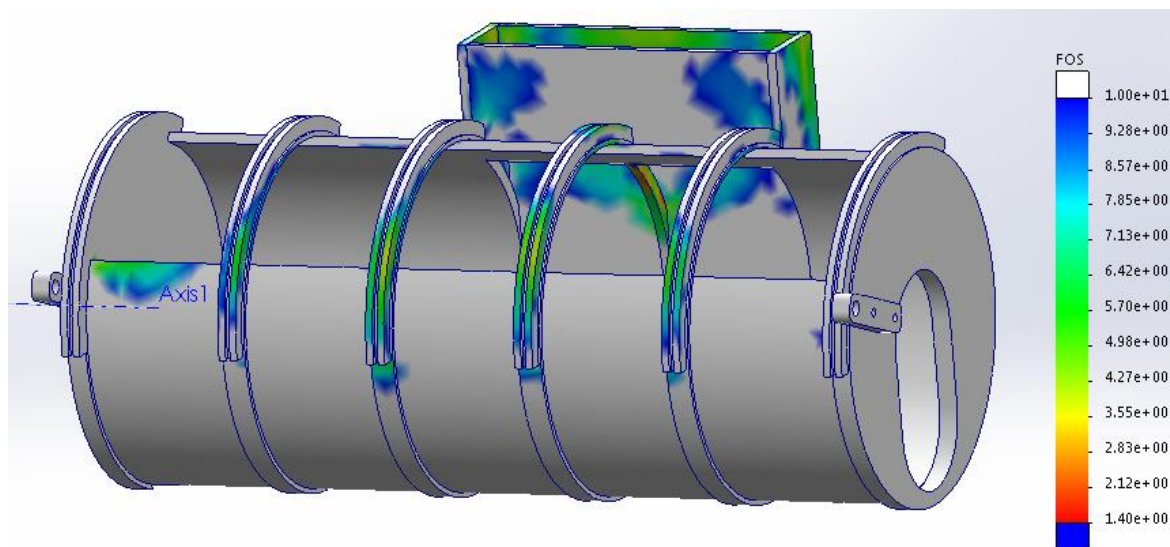
$$p_P = 1 \times \frac{0,23 \times 5350}{0,138 \times 300} \rightarrow p_P = 29,7 \text{ bar}$$

No entanto, esta pressão só se aplica no volume previamente ocupado pela mistura de ar com explosivo. Considerando que a explosão em si corresponde a uma expansão isentrópica adiabática, calculou-se o volume de ar ocupado a partir do qual a pressão do ar é suportável pelo escudo explosivo.

Recorrendo ao modo de simulação estática do solidworks, determinou-se a pressão interna uniforme máxima a que o escudo é capaz de resistir sem ocorrer cedência do material, assumindo-se que o escudo é constituído por aço comum com uma tensão de cedência de 220 MPa e tensão de rotura de 510 MPa.

O efeito da força exercida pelas portas deslizantes na estrutura foi simulado aplicando uma pressão adicional nos apoios das portas, que foi determinada como sendo 13 vezes maior que a pressão interna uniforme através da razão entre a área de superfície das portas e a área de superfície dos apoios.

Pela análise, concluiu-se que a pressão uniforme máxima suportável pelo depósito é de 2,8 bar, apresentando-se na figura a seguir as localizações dos pontos críticos de acumulação de tensões, sob a forma de factor de segurança.



Factor de segurança escudo à explosão (2 bar)

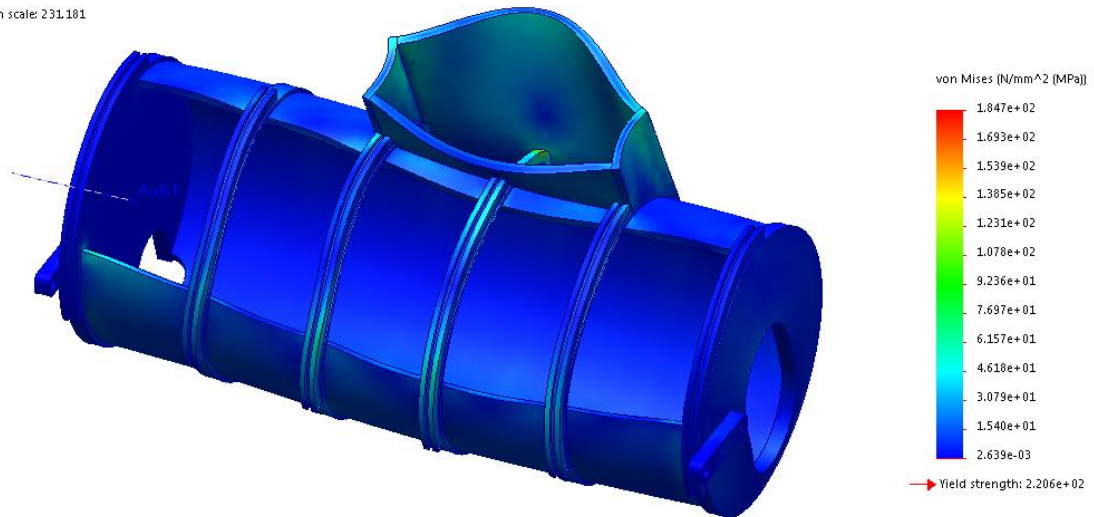
Pela formula da expansão isentrópica adiabática, e empregando como constante de expansão isotrópica n o valor $7/5$, conclui-se que o volume a partir do qual a pressão da onda de choque é inferior a 2,8 bar é de

$$\frac{V_f}{V_i} = \left(\frac{p_i}{p_f}\right)^{\frac{1}{n}} \rightarrow V_f = 6000 \times \left(\frac{29,7}{2,8}\right)^{\frac{5}{7}} \rightarrow V_f = 32\,413 \text{ mm}^3$$

O que assumindo uma expansão esférica, corresponde a um raio de expansão de 19,8 mm – tamanho muito inferior ao tamanho do escudo, que mede 170 mm de raio e quase 900 mm de comprimento. Mesmo que os efeitos locais da explosão sejam suficientes para deformar ou até romper parte da estrutura do escudo, pode-se verificar pela figura da página seguinte que esta tende a ceder primeiro em pontos afastados do operador, sem que as placas em si estejam sujeitas a grande tensão.

Logo em princípio pode-se concluir que tanto o escudo como as portas deslizantes (que têm a mesma espessura) resistem suficientemente aos efeitos de uma explosão e satisfazem os critérios de segurança.

Deformation scale: 231.181



Deformação de escudo à explosão (2 bar)

ANEXO B – TABELAS GRAFCET

Tabela Actuadores

Simbologia grafcet	Descrição
A1	Alimentador de papel
A2	Actuador da prisão das formas
A3	Actuador da prensa
A4	Corrente de transporte
A5	Injector AgCNO
A6	Injector Areia
A7	Pinça papel
A8	Enrolador de estalinho
A9	Actuador do enrolador
A10	Motor da roda de transporte do empacotador
A11	Solenóide que alimenta um folha de papel grosso
A12	Motor rotativo que controla a abertura da garra de papel grosso
A13	Motor rotativo que desloca a garra de metal grosso

A14	Debitador de serradura
A22	Accionamento inverso do actuador da prisão de formas
A211	Accionamento inverso do alimentador de papel grosso

Tabela sensores

Simbologia grafcet	descrição
p1	Sensor de posição, indica que o rolo ainda tem papel
p2	Sensor de posição, indica que o motor da prensa está em posição de espera
p3	Sensor de posição, indica que existe papel pronto a ser prensado
p4	Sensor de posição, indica que a tranca dos moldes está aplicada
p5	Sensor de posição, indica que a tranca dos moldes está recolhida.
p6	Sensor de pressão, indica se existe AgCNO no depósito do injector
p7	Sensor de pressão, indica se existe Areia grossa no depósito do injector
p8	Sensor de posição. indica que a garra mecânica está activada
p9	Sensor de posição, indica que o enrolador está acoplado
p10	Sensor de posição, indica a passagem de uma etapa da plataforma de empacotamento
p11	Sensor de pressão, indica se existe serradura no depósito
p12	Sensor de posição, indica se existem sacos de papel grosso
p13	Sensor de posição, indica que o alimentador de sacos de papel avançou
p14	Sensor de posição, indica que está aberto o mecanismo de posicionamento o papel grosso
p15	Sensor de posição, indica que o mecanismo de posicionamento do papel grosso está em espera
p16	Sensor de pressão, indica que o saco de papel grosso está colocado na caixa de cartão
p17	Sensor de pressão, indica que está pronta embalagem para receber os estalinhos
p18	Sensor de pressão piezo-eléctrico, faz a contagem do número de

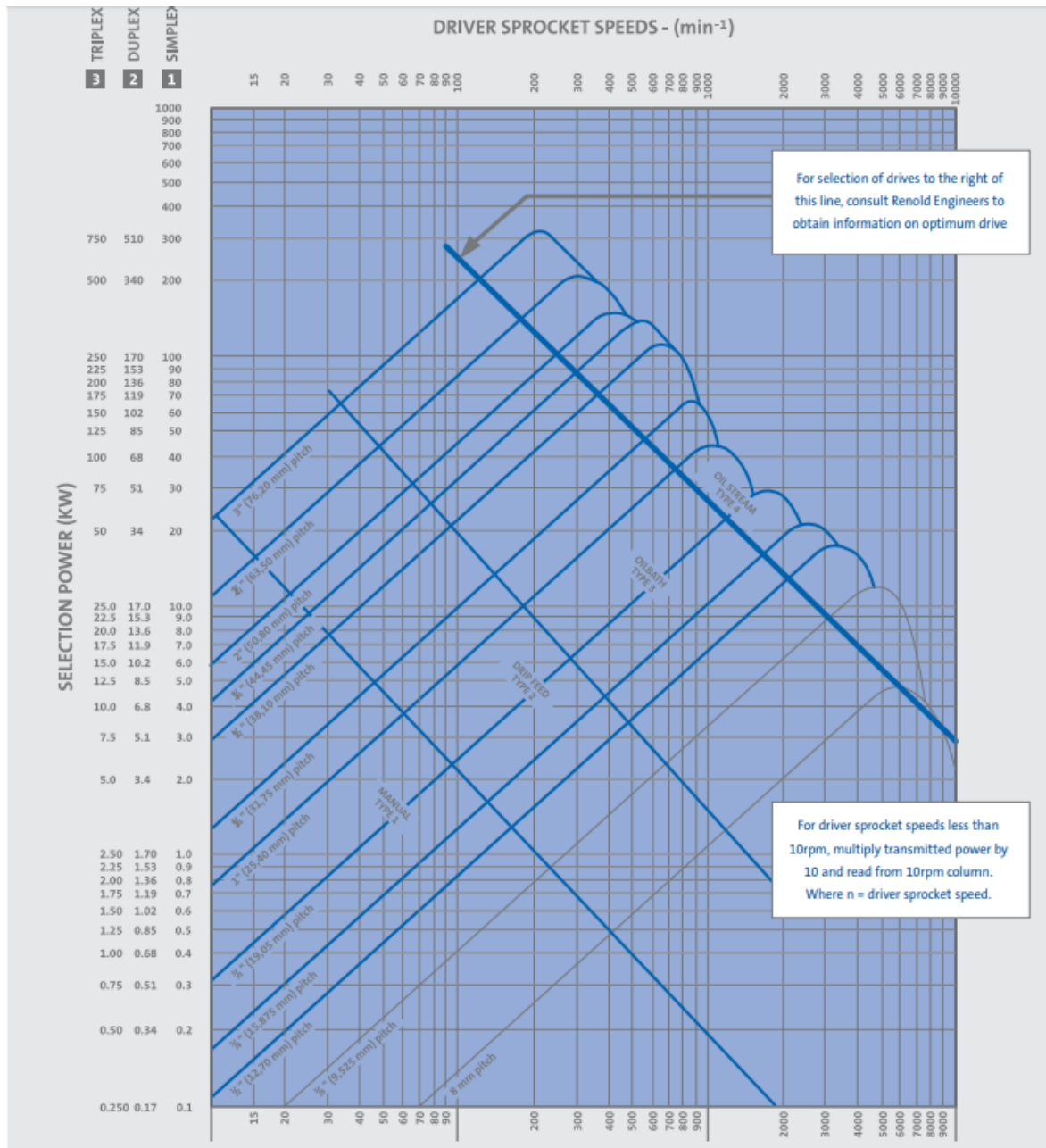
	estalinhos.
c1	Roda dentada, devolve um sinal a cada passagem de matriz.
c2	Roda dentada, devolve um sinal após o enrolador tiver efectuado um número de voltas suficiente.
c6	Roda dentada, devolve um sinal a cada 6 passagens de matriz
t1	Sensor de temperatura, detecta se a superfície do motor eléctrico excede a temperatura de auto ignição do fulminato de prata
b1	Sensor de pressão sonora, indica se ocorreu alguma explosão durante a operação

Tabela sinais, interruptores e memórias

grafcet	Tipo variável	descrição
E1	Sinal	Indica um erro na secção da alimentação de papel
E2	Sinal	Indica um erro na secção de prensagem
E3	Sinal	Indica um erro na linha de montagem
E4	Sinal	Indica um erro na zona de empacotamento
E5	sinal	Erro grave, Paragem total da máquina.
f1	temporizador	Conta o tempo de execução da admissão de papel.
f2	temporizador	Conta o tempo de execução da prensa
f3	temporizador	Conta o tempo de execução da linha de montagem
f4	Temporizador	Conta o tempo de execução do depósito do saco de papel
f5	temporizador	Define o ritmo de produção
s1	Interruptor	Interruptor de segurança, de 2 posições estáveis, obriga a paragem imediata do sistema se não activado
s2	Interruptor	Interruptor de segurança, de 1 posição estável, permite permite que o sistema inicie
s3	Interruptor	Accionado pelo operador para indicar que já está pronta uma nova caixa, regressa à posição inicial quando avança a plataforma de empacotamento.
s4	Interruptor	Operador de 1 posição estável, ordena à máquina para

		avançar um estado.
M1	Bit de memória	Indica que foi atingido o número necessário de estalinhos para o empacotamento.
M2	memória	Conta o número de sinais vindos do sensor piezo eléctrico
M3	memória	Conta o número de sinais vindos do sensor de posição
M4	memória	Conta o número de vezes que a corrente avança antes de se repetir o processo de injeção
x	constante	Indica o erro admissível para o número de estalinhos que entra na caixa.
y	constante	Número de estalinhos por caixa
w	constante	Ajusta o número de passos para o número de injectores
z0	constante	Define o tempo mínimo de produção de cada estalinho (ajuste do ritmo de produção)
z1	constante	Tempo máximo admissível de execução da admissão de papel
z2	constante	Tempo máximo admissível de execução da prensagem
z3	constante	Tempo máximo admissível de execução de cada linha de montagem
z4	constante	Tempo máximo admissível de execução da preparação do saco de cartão.
z5	constante	Tempo máximo para uma secção estar em espera

ANEXO C – GRÁFICO RENOLD



Assumi-se um factor de correcção aos choques de 1,5 (motores eléctricos com funcionamento pulsado) e um coeficiente de fricção global do sistema de 0,7 (apesar de os carretos estarem apoiados em rolamentos, a maior parte das perdas centra-se no contacto entre as guias plásticas e as formas).

O fabricante indica que a massa da corrente por unidade de comprimento é de 0,96 kg/m, e existem duas correntes a funcionar em paralelo. Dividindo o efeito das massas das formas e respectivos enroladores, chega-se a um valor de 1,5 kg/m - pelo que

aplicando a fórmula da força centrípeta obtêm-se uma redução do factor de velocidade máxima de 0,8.

Como o comprimento total de corrente é de 2,764 m, o que corresponde a 174 elos e uma distância entre eixos de 1,183 m, É possível estimar a massa total transportada pela corrente como sendo de 4 kg, para uma força de atrito de 27,5 N.

Consultando o gráfico da renold (fornecido no Anexo C), para uma corrente deste passo lubrificada à mão, a velocidade de rotação de potência nominal (100^{-1}min), a potência absorvida é de 4,163 W – manifestamente inferior à potência nominal de cerca de 2 kW

Procurou-se então obter um ponto à direita do gráfico que satisfizesse as necessidades e reduzisse ao máximo o tempo de deslocamento; calculando uma força máxima de 220,75 N por corrente (permitindo uma grande aceleração), a potência absorvida evolui linearmente.

Pelo método gráfico, estima-se que se seja possível atingir um limite de 378 rpm ou uma velocidade linear de 2,5 m/s para uma potência de atrito absorvida de 0,52 kW, mas que na prática não é atingido pois o movimento é pulsado.

Para a aplicação desta força a que corresponde uma aceleração máxima a_1 de $103,5 \text{ m/s}^2$, e supondo que a desaceleração a_2 é de $6,875 \text{ m/s}$ (apenas por efeito do atrito), o tempo t_3 que a corrente demora a percorrer entre pontos que distam p um do outro é de

$$a_1 t_1 = a_2 t_2 \quad ; \quad 0,5 a_1 t_1^2 + 0,5 a_2 t_2^2 = p \quad ; \quad t_1 + t_2 = t_3$$

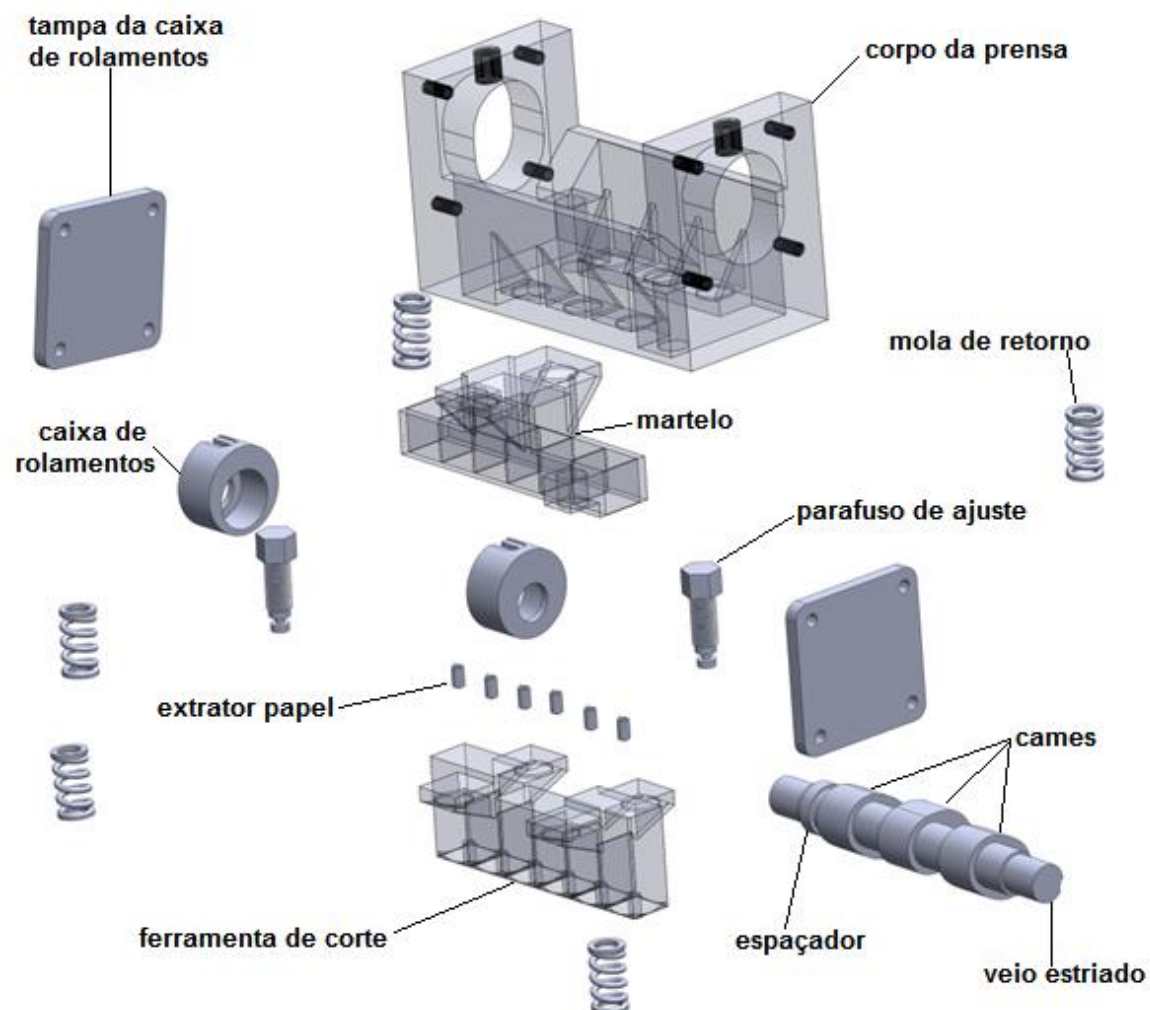
A partir destas equações obtêm-se

$$t_1 = \sqrt{\frac{2p}{a_1} \div \left(1 + \frac{a_1}{a_2}\right)} \quad ; \quad t_2 = \frac{a_1}{a_2} \sqrt{\frac{2p}{a_1} \div \left(1 + \frac{a_1}{a_2}\right)} \quad ;$$

$$t_3 = \left(1 + \frac{a_1}{a_2}\right) \sqrt{\frac{2p}{a_1} \div \left(1 + \frac{a_1}{a_2}\right)}$$

Ou seja para uma distância de 31,75 mm, o tempo é de 0,1 s entre estágios e uma velocidade máxima de 0,64 m/s , ou de 0,24 s e uma velocidade máxima de 1,56 m/s se existirem 6 injectores. se houver travagem o tempo passa a ser de 0,035 s entre estágios ou para 6 injectores 0,21 s. – Conclusão: um sistema de travagem só se justifica se se quiser manter um sistema de 1 injector. A principal vantagem seria a de a posição em que pára a corrente depender menos do atrito.

APÊNDICE A – VISTA EXPANDIDA PRENSA



Curso dos lobos: 15 mm

Força mínima molas exteriores: 7,5 N por mola

Força mínima molas interiores: 6 N por mola

Diâmetro veio: 26 mm

Espessura chaveta: 8 mm

Diametro caixa de rolamentos: 60 mm

Curso caixa: 15 mm

Diâmetro rolamento: 40 mm

Distância entre lobos: 30 mm

Parafuso ajuste: tipo M18

Diâmetro extractor: 8 mm

Comprimento extractor: 13 mm

Curso extractor: 5 mm

Mola de extractor (tracção): 5 mm diâmetro exterior, 1 mm espessura mola

APÊNDICE B – DETALHES TÉCNICOS INJECTORES

Injector fulminato

Massa pistão: 3 gramas

Dimensões pistão: 2 mm diâmetro, 100 mm comprimento, 35 mm curso

Ângulo de chanfragem: 30°

Diâmetro furo: 1 mm.

Área pistão: 1,14159 mm²

Tensão máxima elasticidade: 200 MPa – Liga latão com chumbo ASTM B176.

Força máxima (factor segurança de 5): 45 N

Aceleração máxima (factor segurança de 5): 15220 m/s²

Tempo de ciclo mínimo: 0,003s (330Hz)

Diâmetro de mola: 28 mm

Comprimento mínimo mola: 40 mm

Força mínima mola: 0,03 N

Diâmetro exterior manga: 16 mm

Diâmetro interior de copo: 18 mm

Espessura copo: 3mm

Altura do copo: 21 mm

Injectores de areia.

Volume depósito de areia: 738 cm³

Volume cada cone de admissão: 6,5 cm³

Densidade da areia: 1442 kg/m³

Massa Total de areia: 1,081 kg - 216 doses de 5 gramas

Injector: 20 mm de diâmetro, 110 mm de comprimento.

Furo Injector: 16 mm de diâmetro.

Manga Injector: 26 mm de diâmetro.

Depósito exterior: 190 mm comprimento, 154 mm largura, 3mm espessura.

Diâmetro de mola: 32 mm.

Comprimento mínimo mola: 24,2 mm

Massa do pistão: 250g

Força mínima de mola: 2,5 N.

Área pistão: 26,159 mm²

Material pistão: ferro fundido dúctil temperado.

Tensão limite elasticidade: 500 MPa - 120-90-02 ASTM A536

Força máxima suportável pelo pistão: 2616 N (factor segurança de 5)

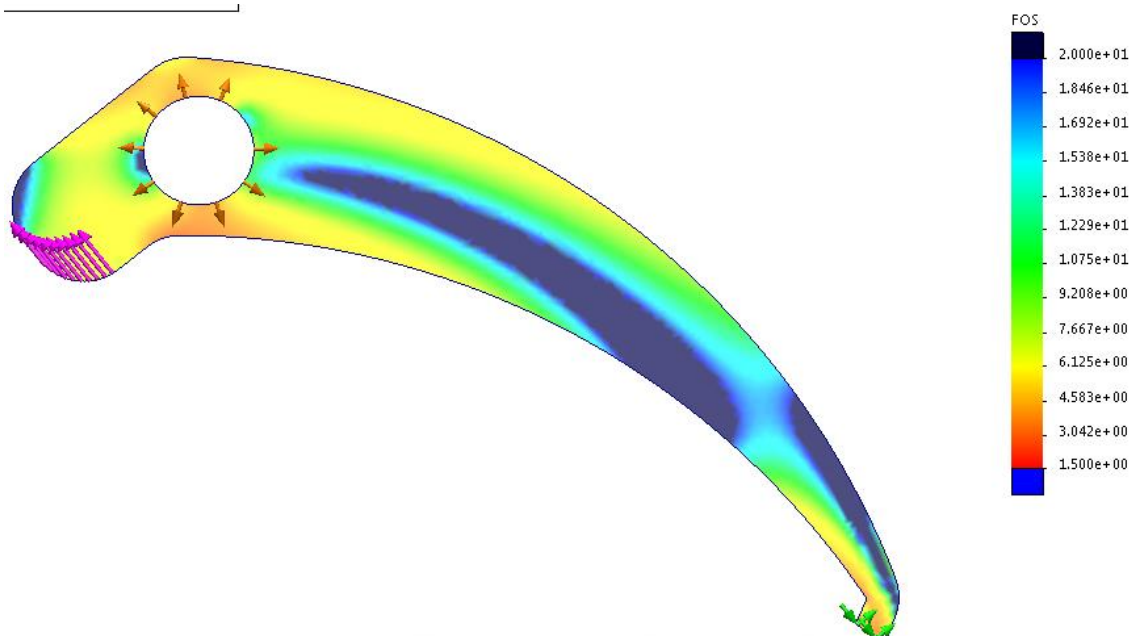
Aceleração máxima (factor de segurança de 5): 10 464 m/s²

Tempo de ciclo mínimo 0,0037 s (270 Hz)

APÊNDICE C – MECANISMO DESLIZANTE GARRA

Para estimar a frequência máxima de operação da garra, admitiu-se que o ponto fraco desta está associado às acelerações máximas que é possível induzir às pontas das garras para completar o seu curso.

Para poder calcular as acelerações, calculou-se primeiro as tensões máximas que é possível induzir a cada ponta através da simulação estática do Solidworks, admitindo que está fixa na ponta, roda livremente em torno do eixo e está sujeita a uma força nas pontas, sendo essa força aumentada até ser atingido um factor de segurança à cedência de 1,5. Os resultados apresentam-se na figura seguinte:



Factor de segurança à garra (carga 600 N)

De seguida calculou-se o momento de inércia da ponta em relação ao eixo. O Solidworks não fornece este dado directamente, mas fornece o momento de inércia em relação ao centro de massa, a posição do centro de massa e a massa total da peça, pelo que o momento de inércia em torno do eixo foi calculado recorrendo ao teorema de Steiner:

$$J = J_s + m \times l_s^2 \rightarrow J = 730,48 + 7,58 \times 9,88^2 \rightarrow J = 1470 \text{ g} \cdot \text{mm}^2$$

O momento torsor sofrido pela peça corresponde ao produto da magnitude da força pelo comprimento do braço efectivo:

$$M = F \times b \rightarrow M = 600 \times 6 \rightarrow M = 3600 \text{ N} \cdot \text{mm} \rightarrow M = 3,6 \times 10^9 \text{ g} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{s}^{-2}$$

Pode-se então calcular a aceleração máxima que se pode induzir à peça pela lei de Newton da aceleração angular:

$$M = J \times \alpha \rightarrow \alpha = \frac{3,6 \times 10^9}{1470} \rightarrow \alpha = 2,5 \times 10^6 \text{ rad. s}^{-2}$$

O curso total das pontas é conhecido, sendo que a deflexão angular equivalente é de 56° , ou seja, 0,98 radianos. Considera-se que a forma mais expedita de obter um ciclo completo consiste numa aceleração constante até metade do curso, seguida de uma aceleração em sentido contrário até ao fim do curso, e repetindo-se estes dois passos no sentido inverso até ser chegada a posição inicial.

Simplificando-se o movimento desta forma, este traduz-se em quatro etapas com a mesma duração, e que cada uma delas pode ser calculada recorrendo à fórmula do movimento uniformemente acelerado:

$$\theta = \alpha \frac{t^2}{2} \rightarrow t = \sqrt{\frac{0,98 \times 0,5 \times 2}{2,5 \times 10^6}} \rightarrow t = 6,3 \times 10^{-4} \text{ s}$$

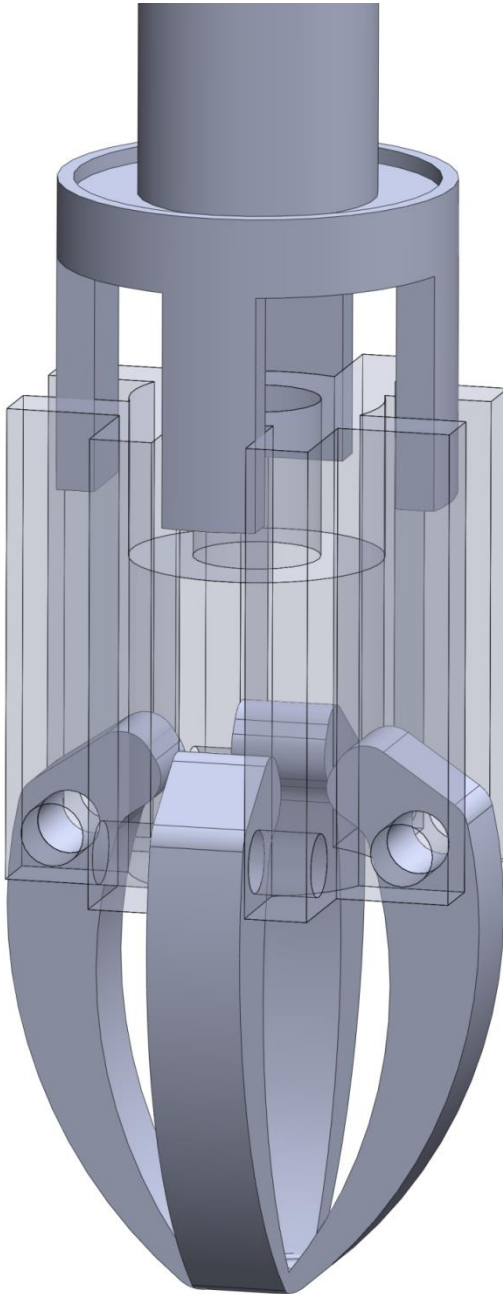
Conclui-se portanto que a ponta da garra não é factor limitador do tempo de operação da garra mecânica, pois o período de ciclo mínimo da garra é de 2,5 milissegundos, o que corresponde a uma frequência de operação de 395 Hz que é muito superior à frequência máxima a que a máquina pode operar.

Entre outros factores, o tempo de execução da máquina é limitado pela frequência de ressonância mínima do sistema do apoio da garra e conjunto de molas – frequência de ressonância que depende da rigidez das molas, pelo que só pode ser determinada após ser determinada uma velocidade de execução alvo.

Note-se também que é possível aplicar um efeito de amortecimento ao sistema ao reduzir as tolerâncias dimensionais do pistão em relação ao apoio da garra e ao apoio das pontas, bem como das tolerâncias dimensionais do veio de suporte das pontas, aumentando o atrito de Coulomb.

No entanto, esse procedimento teria como consequência um maior desperdício de energia sobre a forma de calor, bem como torna provável que o movimento se torne errático e que o estalinho seja mal executado.

Recomenda-se portanto que se opte por uma frequência de ressonância mínima de cerca de 10 vezes maior que a frequência de operação da garra, que se julga suficiente para manter o movimento controlado sem necessidade de amortecimento.



Curso de pistão: 40mm

Curso horizontal: 15 mm

Relação de alavancas das pontas:

- 7 mm interior
- 30 mm exterior

Diâmetro do veio das pontas: 4 mm

Curso do veio deslizante: 20 mm

Relação de alavancas do engrenador:

- 20 mm solenóide
- 110 mm braço.

Dimensões do furo:

- 31 mm raio exterior,
- interior frecha circular
 - 26 mm de comprimento
 - 23 mm de largura.

Chanframento de enrolador:

- 10° junto ao engrenador
- 30° junto à garra

Massa por ponta: 7,58 g – Aço AISI 1015

Massa conjunto ponta e apoios: 36 g

Massa veio deslizante: 88g

Massa total garra: 150g

APÊNDICE D – MÁQUINA DE COMPARAÇÃO



Descrição do processo

Antes de poder ser iniciado o processo, o rolo de papel de seda é cortado por uma máquina separada de forma a ser obtido um rolo de 10 tiras de papel igualmente espaçadas. Esse rolo é então transferido para a máquina de empacotamento, sendo o processo dividido nas seguintes fases:

- 1) As tiras de papel são alimentadas directamente para uma prensa, que de seguida exerce pressão.
- 2) A prensa desloca-se para a frente e alivia a pressão, para de seguida recuar e exercer pressão novamente, deixando papel exposto

- 3) Um cilindro pneumático desloca uma outra prensa, que divide cada tira de papel em 5 quadrados regulares, para um total de 50 quadrados obtidos de uma só vez.
- 4) Dois cilindros concêntricos depositam uma mistura de areia e de fulminato de prata nos 50 quadrados em simultâneo.
- 5) Os estalinhos são torcidos por um processo que não foi possível determinar, soltando o estalinho formado através de um furo
- 6) Os estalinhos largados são agrupados através de um funil metálico e dirigidos para uma folha de plástico transparente
- 7) A folha de plástico transparente é forçada a rodar na forma de um cilindro, e unida nas extremidades por um rolo aquecido
- 8) Uma prensa quente une as duas superfícies de plástico, retendo os 50 estalinhos por cima, e cortando o plástico por baixo
- 9) O plástico avança o suficiente para permitir nova actuação da prensa, deixando cair um saco de plástico formado para uma correia de transporte.

A máquina cessa aqui as suas funções, mas é de presumir que posteriormente o saco de plástico transparente é introduzido numa embalagem de cartão.

O produto final obtido tem o seguinte aspecto:



Figura 6.1 Produto final massificado