



UNIVERSIDADE D
COIMBRA

Carlos Daniel Machado Campos

**ESTUDO DAS CARACTERÍSTICAS DE
EXPLOSIVIDADE DE MICROSFERAS DE
POLÍMERO**

VOLUME 1

Dissertação no âmbito do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica orientada pelo Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes e pelo Professor Doutor José Carlos Miranda Góis e apresentada ao Departamento de Engenharia Mecânica da Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra.

Fevereiro de 2022



Estudo das características de explosividade de microsferas de polímero

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

Study of polymer microspheres explosibility characteristics

Autor

Carlos Daniel Machado Campos

Orientadores

Professor Doutor José Carlos Miranda Góis

Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes

Júri

Presidente	Professor Doutor Adélio Manuel Rodrigues Gaspar Professor da Universidade de Coimbra
Vogais	Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva Ribeiro Professor da Universidade de Coimbra
Orientador	Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes Professor da Universidade de Coimbra

Coimbra, fevereiro, 2022

“Live as if you were to die tomorrow. Learn as if you were to live forever.”

Mahatma Ghandi

Agradecimentos

Quero dar um especial agradecimento aos meus orientadores Ricardo Mendes e José Góis por me guiarem na realização da dissertação e se apresentarem sempre disponíveis quando lhes era requerida ajuda. Agradecer também ao João Pimenta que, na realização dos ensaios, sempre que um dos orientadores não pudesse estar presente mostrou disponibilidade para acompanhar os ensaios e na análise dos mesmos.

Um agradecimento especial aos meus pais que tornaram possível a realização do curso, por todo o esforço e sacrifício que fizeram para que tivesse tudo ao meu dispor para suceder e sem eles não tinha chegado onde cheguei.

Agradecer à minha família que nunca duvidou de mim e por me motivarem a crescer.

Por fim agradecer aos meus amigos que me acompanharam durante estes anos e contribuíram para a minha integração nesta magnífica cidade que é Coimbra. Agradecer-lhes mais uma vez por me mostrarem o verdadeiro espírito académico.

A todos, um bem-haja.

Resumo

Este trabalho teve como propósito caracterizar, através de um método experimental, a explosividade de microsferas poliméricas ocas, Expancel 920 DE 40 d30, utilizadas como aditivo no fabrico de espumas sintáticas, no fabrico do cimento, são usados como adesivos, em revestimentos, entre outros, com o intuito de prevenir situações perigosas aquando o seu manuseamento. Os tamanhos destas partículas podem variar entre 35 e 55 μm , porém o seu diâmetro mais comum é cerca de 40 μm .

Foram realizadas experiências de explosividade numa câmara esférica em aço de 23,9 L, no laboratório de Termodinâmica do Departamento de Engenharia Mecânica da UC, para diferentes concentrações de esferas em suspensão no ar, de modo a determinar a gama de concentrações em que pode existir explosão e valor máximo da pressão de explosão atingido nessa gama de concentrações. Foi simultaneamente determinada a variação da pressão ao longo do tempo de modo a poder determinar o índice k_{st} , que atesta a violência da explosão.

Os resultados obtidos foram determinados para quatro concentrações diferentes sendo estas de 31,25 g/m^3 , 62,5 g/m^3 , 125 g/m^3 e 250 g/m^3 de forma a poder entender o comportamento que a pressão e a sua variação iram ter com este aumento gradual. Os resultados obtidos para as concentrações anteriores para as pressões variaram entre os 1,7 bar e os 7,2 bar e o k_{st} entre os 8,1 $\text{bar}\cdot\text{m}/\text{s}$ e os 233,4 $\text{bar}\cdot\text{m}/\text{s}$. À exceção da concentração de 250 g/m^3 em que a explosão era classificada como sendo St2 todas as outras eram classificadas por St1. Para além de serem testadas as microsferas Expancel, foi também testado o amido de milho para fazer uma comparação com os resultados recolhidos por outros investigadores com o objetivo de calibrar a câmara de explosão de forma a creditar os resultados que se fizeram mostrar nos ensaios. Para o amido de milho as concentrações foram de 250 g/m^3 , 500 g/m^3 e 750 g/m^3 . Os resultados para estas concentrações da pressão variaram entre os 4,2 bar e os 6,6 bar com o k_{st} com um mínimo de 33,9 $\text{bar}\cdot\text{m}/\text{s}$ e a atingir um máximo de 131,7 $\text{bar}\cdot\text{m}/\text{s}$. Tendo em conta o k_{st} destes ensaios, as explosões foram todas da classe St1.

Este trabalho permitiu concluir que o aumento de concentração faz aumentar os valores de pressão máxima e também a variação de pressão.

Palavras-chave: Atmosferas explosivas de poeiras poliméricas,
Explosão de amido de milho, Explosão de poeiras,
Microsferas de polímero.

Abstract

This work aimed to characterize, through an experimental method, a type of polymeric microspheres used as additives called Expancel 920 DE 40 d30 Microspheres. The sizes of these particles can vary between 35 and 55 μm , but their most common diameter is around 40 μm . The importance of this activity is to know the explosive characteristics of this component in order prevent dangerous situations when handling it. They are used in many things such as an additive in the manufacture of syntactic foams and cement, used as adhesives, in automotive and industrial coatings, between others.

Experiments with different concentrations were carried out and the maximum pressure value reached when subjected to an ignition source. In addition to this pressure, it was possible to obtain the variation in pressure over time and understand the difference that existed between different densities.

The tests were carried out in the thermodynamics laboratory located in the Department of Mechanical Engineering at UC. The procedure was to pressurize the dust inside a container connected to the ignition chamber, which is previously in a vacuum. These two initial pressure conditions are very important in carrying out the tests, since in a real situation, the mixture of air with these particles generate a homogeneous cloud and the fact that the chamber is in vacuum and the container is pressurized allows that, when the valve that connects these two components of the equipment is opened, the particles disperse more efficiently and create an atmosphere as homogeneous as possible. Finally, the two ignitors already present in the chamber are called upon by a battery and the ignition occurs which causes an explosion. Pressure values are obtained through a very sensitive sensor that transmits the data to a computer where it can then be collected.

The results obtained were determined for 4 different concentrations, these being 31,25 g/m^3 , 62,5 g/m^3 , 125 g/m^3 and 250 g/m^3 to understand what the pressure and its alternation will have with this gradual increase. The results obtained for pressure were between 4.5 bar and 6,1 bar. For the k_{st} we obtained values that were between 8,1 $\text{bar}\cdot\text{m}/\text{s}$ and a maximum of 233,4 $\text{bar}\cdot\text{m}/\text{s}$. Apart from the concentration of 250 g/m^3 that was

classified as being St2 the others were classified as St1. In addition to this tests for Expancel, corn starch was also tested to make a comparison with the results of experimental tests by other researchers in a way to credit the results that we obtained. For corn starch two tests were performed for each concentration being these 250 g/m³, 500 g/m³ and 750 g/m³.the pressure varied from a minimum of 4,2 bar to a maximum of 6.6 bar. The k_{st} value had a minimum of 33,9 bar.m/s and a maximum of 131,7 bar.m/s. Looking to the results of k_{st} we conclude that all explosions for the corn starch were classified as St1.

With this work we were able to conclude that the increase of the concentration, leads to a increase of the values of maximum pressure and also the rate of change in pressure.

Keywords: Explosive atmosphere of polymers powders, Maize starch explosion, Dust explosion, Polymer microspheres.

Índice

Índice de Figuras	x
Índice de Tabelas	xii
Simbologia.....	13
Siglas	14
1. INTRODUÇÃO.....	15
1.1. Enquadramento e motivação.....	15
2. Estado da arte.....	17
2.1. Conceitos teóricos sobre explosão de poeiras.....	17
2.1.1. Mecanismo de explosão de poeiras	17
2.1.2. Situação mundial da sinistralidade atribuída à explosão de poeiras.....	18
2.1.3. Indústrias com maior sinistralidade.....	19
2.1.4. Fontes de ignição mais comuns	21
2.1.5. Explosões primárias e secundarias	23
2.1.6. Fatores que influenciam a explosão de poeiras	24
2.2. Explosividade do amido de milho	26
3. Método de ensaio e segurança	29
3.1. Procedimento do teste	29
3.1.1. Condições iniciais.....	29
3.1.2. Segurança.....	29
3.2. Análise experimental	30
3.2.1. Câmara de explosão.....	31
3.2.2. Fonte de ignição	32
3.3. Procedimento experimental	32
3.4. Correção da pressão máxima	35
4. Análise de resultados e calibração.....	39
4.1. Curva de pressão	39

4.2. Explosão causada pelos ignidores.....	40
4.3. Resultado da explosão das microsferas.....	41
4.3.1. Ensaio para uma concentração de 31,25 g/m ³	42
4.3.2. Ensaio para uma concentração de 62,5 g/m ³	43
4.3.3. Ensaio para uma concentração de 125 g/m ³	45
4.3.4. Ensaio para uma concentração de 250 g/m ³	46
4.4. Comparação de resultados	48
4.5. Calibração	51
4.5.1. Testagem do amido de milho	53
5. conclusão	61
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	64
ANEXO A	66
ANEXO B	69

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 2.1 – Número de casos registados entre 1785 e 2012 (Yuan et al.,2015)	19
Figura 2.2 – Indústrias envolvidas nas explosões no Mundo (adaptado de Yuan et al., 2015).....	19
Figura 2.3 - Tipos de Indústria relacionadas com as Explosões nos Estados Unidos da América (adaptado de Yuan et al., 2015).....	20
Figura 2.4 - Tipos de Indústria relacionadas com as explosões na China (adaptado de Yuan et al., 2015).....	21
Figura 2.5 – Principais fontes de ignição de suspensões de poeiras em meio industrial (adaptado de Yuan et al., 2015).....	22
Figura 2.6 - Efeito dominó na geração de explosões secundárias (Abbasi & Abbasi, 2007b)	24
Figura 2.7 - Pressão de explosão numa câmara de 20 l com o aumento da concentração (Tascón et al., 1016).....	26
Figura 2.8 - Taxa máxima da variação de pressão com o aumento de concentração (Tascón et al., 2016).....	27
Figura 3.1 - Câmara de explosão onde se realizaram os ensaios localizado no DEMUC... 31	
Figura 3.2 - Câmara de explosão (Norma EN 14034-2:2006)	31
Figura 3.3 - Quadro elétrico de controlo (DEMUC)	34
Figura 3.4 - Temporizadores do quadro elétrico de controlo	34
Figura 3.5 - Amplificador de carga (PLB – Model 484B11)	35
Figura 4.1 – Curva de pressão característica de um ensaio de explosividade (Sousa, 2013)	39
Figura 4.2 – Curva de pressão máxima obtida com apenas as cargas pirotécnicas.....	40
Figura 4.4 - Curva de pressão para uma concentração de 31,25 g/m ³	42

Figura 4.3 – Curva de taxa de aumento de pressão para uma concentração de 31,25 g/m ³	43
Figura 4.5 -Curva de pressão para uma concentração de 62,5 g/m ³	44
Figura 4.6 - Curva de taxa de aumento de pressão para uma concentração de 62,5 g/m ³ ...	44
Figura 4.7 - Curva de pressão para uma concentração de 125 g/m ³	45
Figura 4.8 - Curva de taxa de aumento de pressão para uma concentração de 125 g/m ³	45
Figura 4.9 - Curva de pressão para uma concentração de 250 g/m ³	46
Figura 4.10 - Curva de taxa de aumento de pressão com uma concentração de 250 g/m ³ ..	47
Figura 4.11 - Curvas de pressão obtidas para as concentrações utilizadas nos ensaios	48
Figura 4.12 - Comparação dos resultados obtidos para a pressão nas diferentes concentrações	49
Figura 4.13 - Curvas do aumento de pressão ao longo do tempo para as diferentes concentrações utilizadas	49
Figura 4.14 – Valores do k _{st} obtidos para os ensaios nas diferentes concentrações	50
Figura 4.16 - Interior do recipiente de poeiras após o ensaio.....	52
Figura 4.15 - Depósito de amido de milho nas paredes interiores que não reagiu durante a explosão.....	52
Figura 4.17 - Curva de pressão para uma concentração de 250 g/m ³	54
Figura 4.18 – Curva de taxa de aumento da pressão para uma concentração de 250 g/m ³ .	55
Figura 4.20 – Curva de taxa de aumento da pressão para uma concentração de 500 g/m ³ .	56
Figura 4.19 - Curva de pressão para uma concentração de 500 g/m ³	56
Figura 4.22 – Curva de taxa de aumento da pressão para uma concentração de 750 g/m ³ .	57
Figura 4.21 - Curva de pressão para uma concentração de 750 g/m ³	57
Figura 4.23 - Evolução da pressão dos ensaios realizados no DEMUC (azul) vs Tascón et al.,2016 (vermelho).....	58
Figura 4.24 - Evolução do valor máximo do aumento de pressão dos ensaios realizados no DEMUC (azul) Vs Tascón et al.,2016 (vermelho).....	59

Figura 0.1 - Curva de pressão para uma concentração de 250 g/m ³	66
Figura 0.2 - Curva de taxa de aumento de pressão para uma concentração de 250 g/m ³	66
Figura 0.3 - Curva de pressão para uma concentração de 500 g/m ³	67
Figura 0.4 - Curva de taxa de aumento de pressão para uma concentração de 500 g/m ³	67
Figura 0.5 - Curva de pressão para uma concentração de 750 g/m ³	68
Figura 0.6 - Curva de taxa de aumento de pressão para uma concentração de 750 g/m ³	68

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1 - Tabela resumo dos resultados obtidos por Tascón (adaptado de Tascón et al., 2016).....	27
Tabela 2 – Valores correspondentes de cada classe atendendo ao valor do k_{st}	36
Tabela 3 - Tabela resumo dos resultados do amido de milho	51
Tabela 4 - Tabela resumo dos resultados das microsferas Expancel.....	69

SIMBOLOGIA

P – Pressão [bar]

$P_{\text{máx}}$ – Pressão máxima [bar]

P_{atm} – Pressão atmosférica [bar]

P_{ex} – Pressão de explosão [bar]

P_{ci} – Pressão provocada pelos ignidores [bar]

P_{d} – Pressão de expansão [bar]

$(\partial P/\partial t)$ – taxa de variação da pressão [bar/s]

$(\partial P/\partial t)_{\text{máx}}$ – taxa máxima de variação de pressão [bar/s]

E_{i} – Energia de ignição [J]

t_{l} – Tempo de duração da combustão [s]

t_{v} – Tempo de atraso de ignição [s]

t_{d} – Tempo de atraso de fecho da válvula [s]

Δt_{i} – Intervalo entre a ativação do ignidor e a explosão do mesmo [s]

t_{i} – Tempo entre o fecho da electroválvula e a ativação do ignidor [s]

$k_{m\acute{a}x} = k_{st}$ – Constante específica do produto [bar.m/s]

V – Volume [m³]

Siglas

FCTUC – Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra

DEMUC – Departamento de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra

LOC – Limite de concentração de oxigénio

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento e motivação

Com a evolução da indústria e a necessidade de obter produtos com melhores propriedades e mais fáceis de adquirir, foi descoberta uma microsfera de polímero de pequenas dimensões que contém gás no seu interior. Caracterizadas pela sua leveza, facilidade e custos de produção reduzidos, grande elasticidade, uniformidade, entre outras tantas características, estas partículas foram exploradas e passaram a fazer parte de uma grande variedade de produtos. A sua utilização como aditivos implicou um estudo das suas características de modo que se pudesse tirar melhor partido das mesmas, onde quer que estas fossem utilizadas.

Estas microsferas são inflamáveis o que leva que quando sujeitas a uma fonte de ignição com energia suficiente irão reagir, gerando a um aumento de pressão local e a propagação da própria explosão ao longo da mistura ar/poeira, colocando em risco pessoas e bens que esteja perto do acontecimento. Assim sendo, é necessário fazer um estudo das características de explosividade destas microsferas uma vez que podem gerar reações muito violentas de combustão com propagação de chama ao longo da mistura existente no ar. Estes acidentes em espaços fechados têm capacidade de aumentar a pressão máxima significativamente, normalmente entre 7 e 10 bar.

O número de incidentes registados por ano indica que estes eventos ainda são frequentes por todo o mundo e que para além disso, apresentam ainda tendência para aumentar. São vários os fatores que podem originar a ocorrência destes eventos explosivos, por exemplo, o mau manuseamento e armazenamento dos produtos e à falta de noção quanto ao risco de segurança a que os trabalhadores estão sujeitos aquando da sua utilização que os torna potenciais causadores destes acidentes. A legislação europeia e nacional já prevê medidas de segurança e regras de proteção dos trabalhadores contra os riscos de exposição a atmosferas explosiva, através do Decreto-Lei nº 236/2003, de 30 de setembro, que transpõe para a ordem jurídica interna a Diretiva nº 1999/92/CE, do Parlamento Europeu e do Conselho, de 16 de dezembro

Estas poeiras inflamáveis podem ser encontradas em várias indústrias sob a forma de subprodutos, por exemplo, pó de carvão perfurado em minas de carvão, pó de madeira na indústria de madeira ou até na forma de matérias-primas ou produtos intermediários como é o caso o açúcar em pó nas fábricas de processamento de alimentos.

2. ESTADO DA ARTE

2.1. Conceitos teóricos sobre explosão de poeiras

2.1.1. Mecanismo de explosão de poeiras

Se uma nuvem de poeira inflamável se encontrar em suspensão no ar, caso seja exposta a uma fonte de ignição com energia suficiente para a fazer reagir e se estiver num espaço confinado, pode gerar uma combustão muito rápida (designada de explosão), originando uma chama que se propaga ao longo da nuvem. Esta combustão vai depender de vários fatores e características da poeira em questão.

A combustão de poeiras tem certas semelhanças com a combustão de gases pré-misturados. Segundo Echhoff (2000), algumas das semelhanças são:

- Limites de inflamabilidade/explosividade;
- Velocidades de queima laminar e distância de extinção;
- Resposta da velocidade de queima tendo em conta a turbulência da nuvem;
- Pressões de explosão adiabática de volume constante de magnitudes semelhantes;
- Energias mínimas de ignição definidas;
- Temperaturas mínimas de ignição para determinadas condições experimentais.

Duas grandes diferenças a ter em conta entre as poeiras e os gases para que as condições de segurança sejam as melhores são:

- Em zona de fabrico, de transporte e manutenção, há uma maior facilidade em serem formadas nuvens inflamáveis tanto para poeiras como para gases/vapores. No entanto, as nuvens de poeiras explosivas são improváveis de se formar, ao contrário do que acontece com as nuvens de gases que apresentam uma maior facilidade e rapidez no que toca a esta situação;

- Uma outra diferença fundamental é o alcance da concentração do combustível (poeiras ou gases/vapores). A propagação da chama só se efetua enquanto a concentração do combustível se encontra entre o mínimo e o máximo dos limites de inflamabilidade. Porém, no caso das poeiras estas podem estar em camadas/depósitos estagnados que por ação de uma primeira explosão geram uma suspensão de poeiras, dando origem à propagação da combustão, com explosões secundárias contínuas.

A explosão provoca uma sobrepressão aérea num curso espaço de tempo, da ordem de ms. Os efeitos que esta pode ter sobre algum objeto ou pessoa vai depender da distância a que este se encontre da origem da explosão e das explosões secundárias que podem suceder. Uma das ameaças é a possível formação de projéteis de pequenos ou grandes volumes. Quanto maior for o material maior será a letalidade e maior a probabilidade de causar danos mais severos. No que toca a trabalhadores que se encontrem no local, o risco associado a cada um depende do grau de proteção individual ou barreiras físicas que possam existir. Este risco individual é definido como a probabilidade de letalidade para uma pessoa desprotegida nas proximidades de um local perigoso.

2.1.2. Situação mundial da sinistralidade atribuída à explosão de poeiras

Os locais onde as explosões de poeiras têm mais probabilidade de ocorrência depende não só do tipo de atividades que desenvolvem, mas também do desenvolvimento económico dos diferentes países e da legislação vigente e da sua aplicação. Nos países mais desenvolvidos, em que existe grande quantidade de indústrias este risco pode ser mais elevado.

Os registos conhecidos revelam que o maior número de casos têm ocorrido nos Estados Unidos da América, sendo relatados 1611 casos desde 1785. Para além deste são reportados vários casos na China, Japão, Canadá e ainda os países europeus. Claramente se constata que países mais desenvolvidos economicamente, e mais industrializados são onde existem maior número de casos de acidentes atribuídos a explosão de poeiras (Yuan et al., 2015).

A Figura 2.1 mostra o número de casos ocorridos registados entre 1785 e 2012. No entanto na recolha destes dados os números de acidentes reportados é inferior aos que acontecem na realidade, uma vez que acidentes de menor gravidade muitas vezes não são reportados e as constantes atualizações nos incidentes provoca uma inconsistência nas informações que são recolhidas pelo que estes números podem ser superiores ao que são mostrados (Yuan et al., 2015).

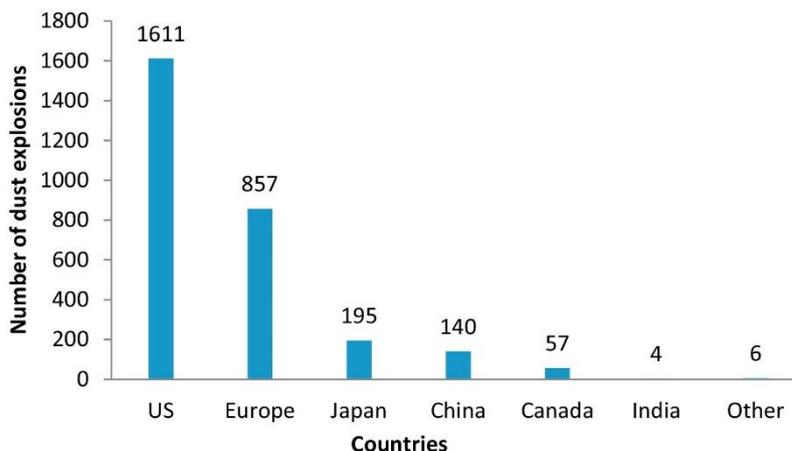


Figura 2.1 – Número de casos registrados entre 1785 e 2012 (Yuan et al., 2015)

2.1.3. Indústrias com maior sinistralidade

As indústrias alimentares, de transformação de madeira, produção de metais e extração de carvão são aquelas em que há reporte de mais casos de explosões de poeiras. As figuras seguintes retiradas de um artigo de Yuan et al., (2015) com a repartição dos acidentes com explosões de poeiras no Mundo e em dois países industrializados mostram que as indústrias alimentares e transformação de madeira são as que apresentam maior número de casos. No caso da China, em que o carvão é ainda um combustível relevante, existem vários casos de acidentes na indústria extrativa relacionada com carvão (Yuan et al., 2015).

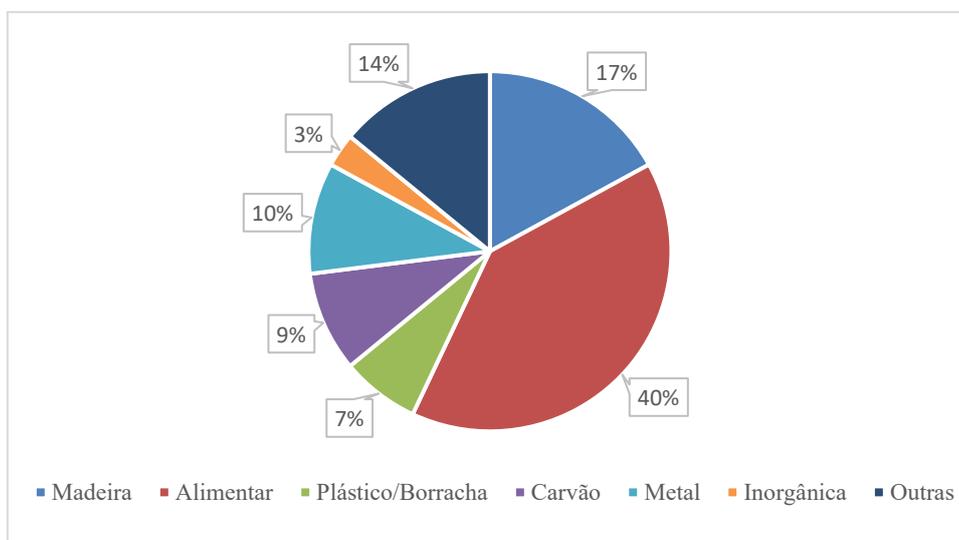


Figura 2.2 – Indústrias envolvidas nas explosões no Mundo (adaptado de Yuan et al., 2015)

Os Estados Unidos da América e a China são os países que apresentam a maioria dos casos registados no mundo, o que se explica pela dimensão desses países e forte industrialização, mais recente no caso da China. O primeiro é caracterizado pelo maior número de explosões registadas e o segundo pelo facto de a sua maior fonte de energia ser o carvão, cerca de 60% do total (Liang et al., 2021).

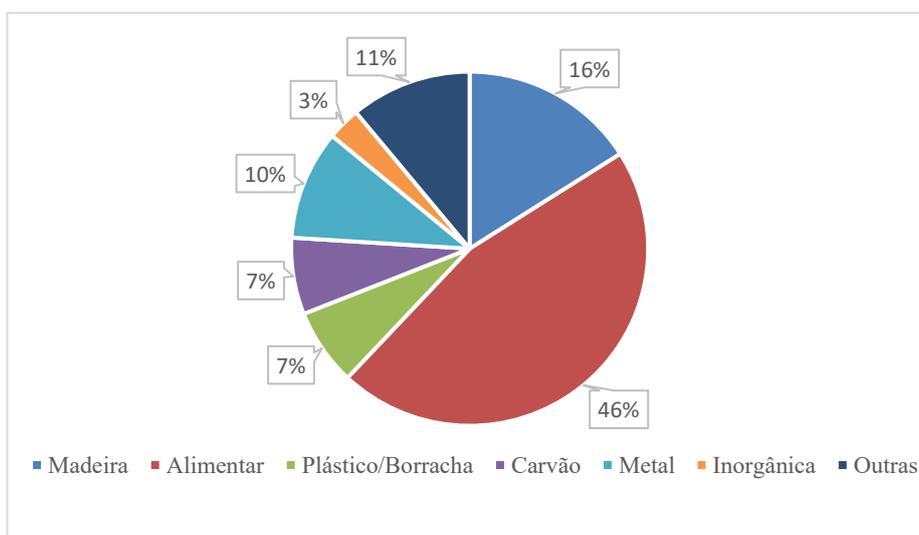


Figura 2.3 - Tipos de Indústria relacionadas com as Explosões nos Estados Unidos da América (adaptado de Yuan et al., 2015)

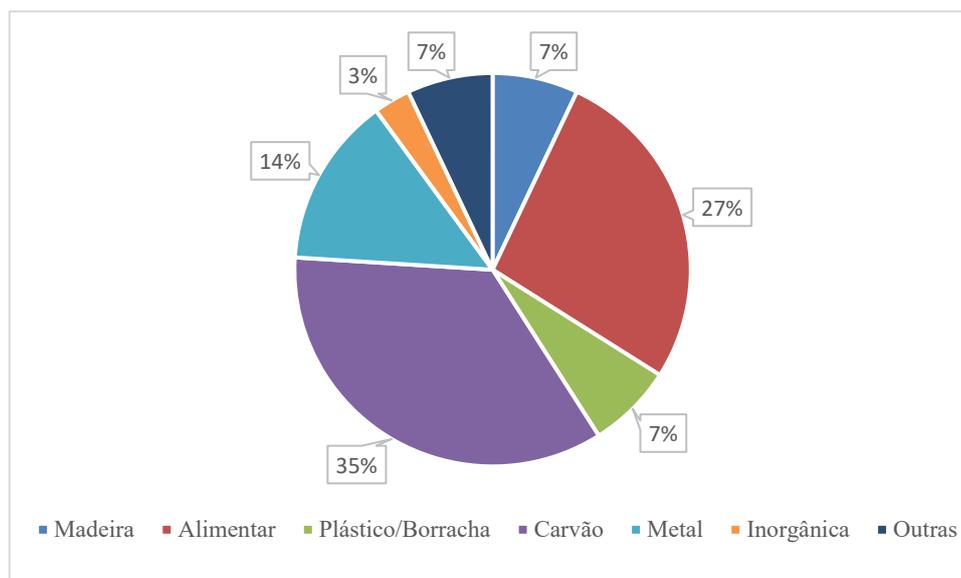


Figura 2.4 - Tipos de Indústria relacionadas com as explosões na China (adaptado de Yuan et al., 2015)

Estes tipos de acidentes têm sido recorrentes ao longo do tempo. Cerca de 2000 casos conhecidos ocorreram entre 1785 e 2012 e são uma ameaça constante às pessoas, materiais e ao ambiente envolvente (Yuan et al., 2015).

Um dos casos mais conhecidos e graves da história ocorreu numa mina de carvão em Liaoning, na China, em 1942, levando a 1594 mortos e de 246 feridos. De notar que a China é o país que possui um maior número de fatalidades na exploração de minas, muito pela cada vez maior profundidade, mas também pelas condições precárias em termos de segurança. Só entre 1950 e 2018 ocorreram 188 acidentes de natureza catastrófica em minas de carvão que causaram a morte de 11526 pessoas (Zheng et al., 2009).

2.1.4. Fontes de ignição mais comuns

Em todas as ignições tem de haver energia suficiente para as provocar, daí ser importante ter atenção a tudo o que pode originar essa energia de modo a prevenir uma potencial explosão. São bastantes as formas que podem originar uma explosão de uma suspensão de poeiras no ar:

- Chama e calor direto;
- Trabalhos a quente;

- Faíscas elétricas;
- Faíscas estáticas;
- Faíscas de impacto;
- Auto aquecimento e combustão lenta;
- Faíscas de fricção;
- Superfícies quentes;
- Entre outros.

A figura seguinte permite ter uma ideia de quais as fontes que mais contribuem para uma explosão de poeiras.

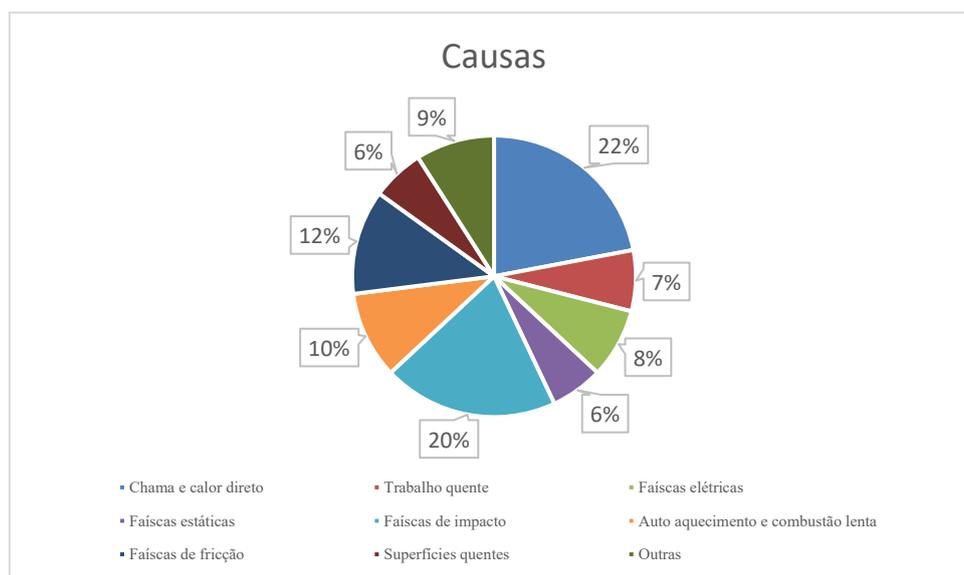


Figura 2.5 – Principais fontes de ignição de suspensões de poeiras em meio industrial (adaptado de Yuan et al., 2015)

A chama e o calor direto e as faíscas de impacto são os principais causadores de ignição de suspensão de poeiras. Esta principal causa pode ser resolvida de forma muito simples com o aquecimento indireto, por exemplo, através da circulação de água quente através de tubos e o isolamento das tubagens.

Há operações que geram produção de calor com temperaturas muito elevadas, nomeadamente a soldadura e corte, que quando expostas a uma suspensão de poeira podem gerar uma explosão. Isto acontece em situações em que os equipamentos não são limpos de forma apropriada, levando à acumulação destas poeiras relacionadas com o trabalho.

A instalação e equipamentos elétricos em zonas em que há muita probabilidade de existirem atmosferas potencialmente inflamáveis deve ser muito bem ponderada. Os equipamentos podem ser instalados tanto dentro como fora de recintos, como por exemplo nos silos, onde voluntariamente ou involuntariamente podem ser formadas nuvens de poeiras e este contacto no caso de um mau funcionamento de uma máquina elétrica pode originar faíscas levando a uma explosão. Outro destes casos, deve se à infiltração de poeiras inflamáveis nos próprios equipamentos aquando o seu arrefecimento sob pressão o que faz com muitas sejam puxadas pelo próprio equipamento acumulando-se assim no seu interior não como uma nuvem, mas sim em camadas (Rolf K. Eckhoff, 2000). Nas zonas onde existe o perigo de explosão de poeiras devem ser instalados equipamentos com certificação ATEX, cumprindo as normas e a legislação¹.

2.1.5. Explosões primárias e secundárias

A maioria das explosões de poeiras começa em algum tipo de equipamento (como por exemplo silos e misturadoras) e geram as chamadas de explosões primárias. Estas explosões podem originar explosões secundárias, criando assim um efeito dominó (Figura 2.6). Isto acontece quando primeira explosão levanta camadas de pó que se encontram próximas que também podem ser inflamáveis, ocorrendo a ignição a partir do calor gerado pela primeira explosão. Apesar de ocuparem pouco espaço, uma vez perturbadas estas camadas de poeira podem formar nuvens muito perigosas onde, por exemplo, uma camada com apenas 1mm com 500 kg/m^3 pode levantar uma nuvem com 5 m de altura com uma concentração de 100 g/m^3 (Abbasi & Abbasi, 2007b).

Esta iteração entre explosões tem tendência a acelerar a propagação da chama devido a turbulência criada. De acordo com experiências realizadas entre duas câmaras são obtidos elevados valores de pressões, mesmo que na segunda câmara não seja espectável um valor elevado de explosividade, K_{st} . Pode não ocorrer explosão na segunda câmara devido à quebra nas propriedades da poeira que se encontra na segunda câmara, seja pela sua concentração

¹ [Decreto-Lei n.º 111-C/2017, de 31/08](#) - Estabelece as regras de segurança a que devem obedecer os aparelhos e sistemas de proteção destinados a ser utilizados em atmosferas potencialmente explosivas

no ar, diâmetro da poeira entre as duas câmaras, existência de obstruções, entre outros (Kosinski & Hoffmann, 2005).

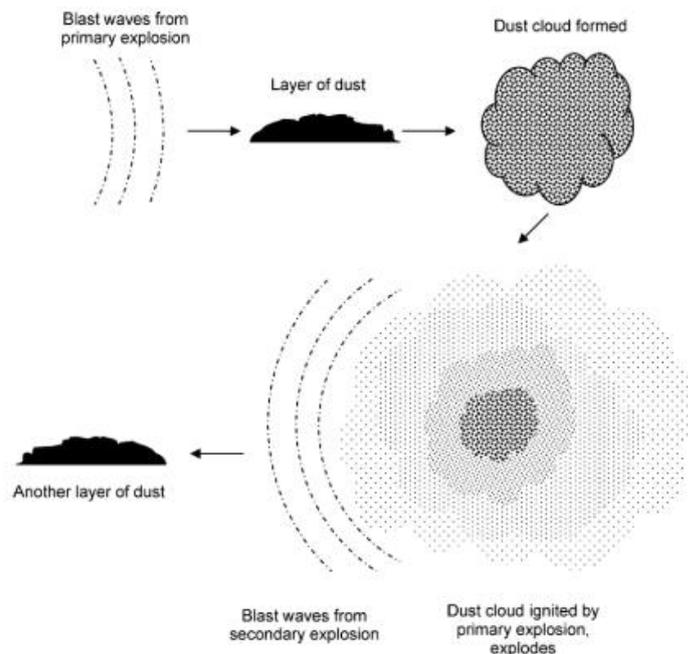


Figura 2.6 - Efeito dominó na geração de explosões secundárias (Abbasi & Abbasi, 2007b)

2.1.6. Fatores que influenciam a explosão de poeiras

2.1.6.1. Tamanho das partículas

A propagação da chama ao longo da nuvem pode ocorrer quer pela combustão dos gases inflamáveis emitidos pelas partículas aquecidas, quer pela oxidação direta na superfície das partículas de poeira. Em qualquer um destes casos o tamanho da partícula tem um papel importante na combustão.

Partículas mais finas reagem de forma mais rápida e mais eficiente do que partículas mais grossas do mesmo componente, isto porque as mais finas possuem uma maior área por

unidade de superfície, o que faz com que tenham uma maior capacidade para se dispersar no ar e se manter dispersas e em suspensão por mais tempo.

A concentração mínima de explosividade é independente do tamanho para pós muito finos, mas para partículas com tamanho superior a 30 μm este valor vai aumentando o que significa que será necessária uma fonte de ignição com maior energia para originar uma explosão (Abbasi & Abbasi, 2007b).

2.1.6.2. Concentração de oxigénio

Como é sabido o oxigénio é um elemento fundamental para que haja combustão, portanto caso a atmosfera não o tiver presente ou a percentagem for baixa (abaixo do LOC) não ocorre qualquer explosão. Uma das formas de prevenir uma explosão passa pela criação de uma atmosfera inerte, ou descer a concentração de oxigénio abaixo do LOC. A concentração de oxigénio deve ser superior a 10% para que ocorra explosão (Abbasi & Abbasi, 2007b). Acima do LOC, em função da concentração de oxigénio, a velocidade da combustão, a sobrepressão e a velocidade de crescimento da pressão podem aumentar, tornando as explosões mais intensas. Os valores máximos são atingidos para concentrações de oxigénio próximas das condições estequiométricas.

2.1.6.3. Temperatura mínima de ignição

A temperatura mais baixa para que uma ignição ocorra é designada por temperatura mínima de ignição e aumenta com a quantidade de elementos que tornem a mistura mais inerte e até mesmo com a humidade. Esta temperatura aumenta com a diminuição do tamanho da partícula, com a adição de matéria volátil, com a concentração de oxigénio e com a espessura da camada (Abbasi & Abbasi, 2007a).

O valor da temperatura mínima de ignição é muito importante para eliminar potenciais fontes de ignição e para desenvolver sistemas de prevenção.

2.1.6.4. Humidade

O aumento da humidade faz aumentar a temperatura de ignição. Para além disto a deflagração torna-se mais complicada, dado que diminui a concentração de oxigénio e a evaporação de água provoca uma melhor dissipação do calor, prevenindo assim o aumento da temperatura. Complementarmente, a humidade aumenta a coesão entre as partículas de forma que as ligações sejam mais fortes e não permitam a formação de grandes nuvens que tornem as explosões muito violentas.

2.2. Explosividade do amido de milho

Os resultados obtidos por Tascón (2016), foram realizados com recurso a um silo de aço com 1,9 m de diâmetro, no entanto os valores de pressão e variação de pressão foram retirados de ensaios realizados numa câmara de 20 l. Os resultados provenientes não são exatos uma vez que só temos acesso a duas imagens que se encontram no documento, mas são perceptíveis para se puder fazer uma comparação com os ensaios realizados no DEM.

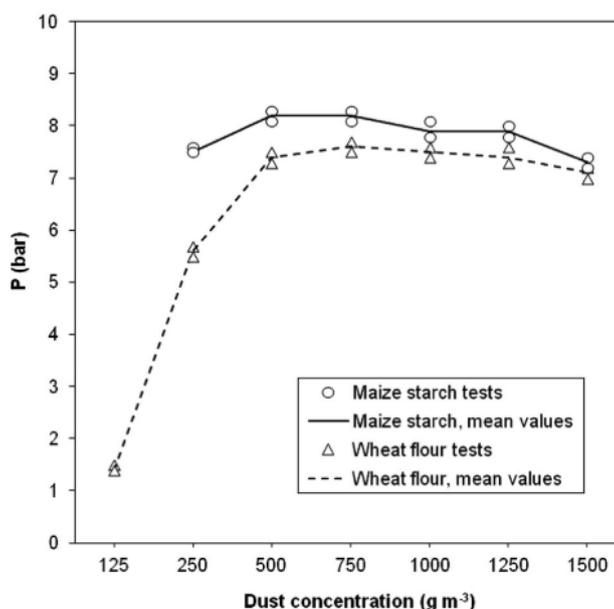


Figura 2.7 - Pressão de explosão numa câmara de 20 l com o aumento da concentração (Tascón et al., 1016)

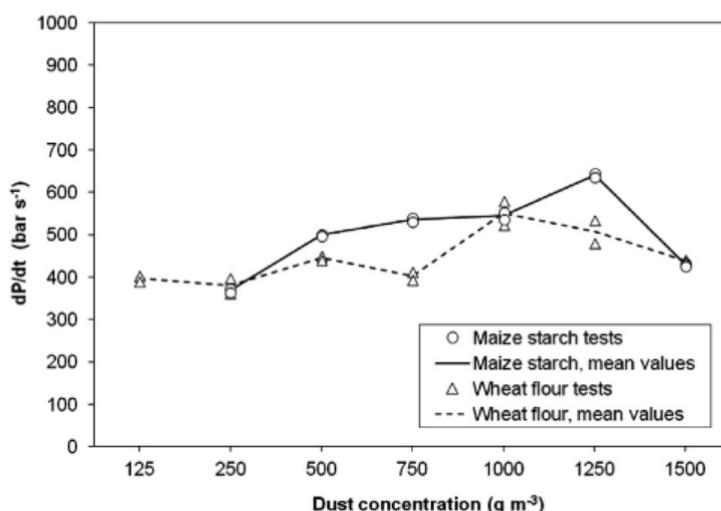


Figura 2.8 - Taxa máxima da variação de pressão com o aumento de concentração (Tascón et al., 2016)

Na figura 2.7 a pressão não apresenta grandes diferenças notando-se um ligeiro aumento de 250 g m^{-3} para 500 g m^{-3} , porém a partir desta última concentração vai descendo gradualmente. Este facto pode dever-se à diminuição da concentração de oxigénio, por exemplo que leva a que a explosão não tenha tanta capacidade para se alastrar de forma a enfraqueça a mesma. Em termos do aumento de pressão aumentou gradualmente com a concentração e atingiu o seu pico com 1250 g m^{-3} .

Para os resultados demonstrados nas imagens 2.7 e 2.8 foram extraídos os valores para as três primeiras concentrações:

Amido de milho			
Concentração [g m^{-3}]	Ensaio	Pressão corrigida [bar]	$(\partial P/\partial t)_{\text{máx}}$ [bar/s]
250	1	7,4	353
	2	7,6	364
500	3	8,1	498
	4	8,3	496
750	5	8,1	523
	6	8,2	538

Tabela 1 - Tabela resumo dos resultados obtidos por Tascón (adaptado de Tascón et al., 2016)

3. MÉTODO DE ENSAIO E SEGURANÇA

3.1. Procedimento do teste

3.1.1. Condições iniciais

Para obter resultados mais próximos da realidade e de forma a pudermos comparar os resultados obtidos para cada densidade é necessário que todos os testes ocorram com as mesmas condições iniciais. Para isso temos:

- Pressão de dispersão, $p_z = 20 \text{ bar}$;
- Pressão inicial, $p_i = 0.4 \text{ bar}$;
- Temperatura inicial igual, $T_i \approx 20 \text{ }^\circ\text{C}$;
- Tempo de atraso da ignição, $t_v = 60 \text{ ms}$;
- Dois ignidores com energia de 5 kJ cada um.

Tendo estas condições todas reunidas é possível realizar os ensaios.

3.1.2. Segurança

No que toca a segurança deve-se ter os seguintes cuidados:

- Precauções devem ser tomadas para evitar ignição acidental de forma eletrostática, fricção, impacto ou outros meios durante o manuseio das amostras de poeira, e dispositivos de ignição químicos;

- Deve-se garantir que qualquer abertura da câmara de explosão esteja devidamente fechada antes da realização de um teste;

- O pessoal que estiver a realizar o teste deve estar equipado ou a uma distância de segurança caso o teste não corra bem de modo que não seja atingido com projéteis que possam resultar do teste,

-Na abertura da câmara de explosão depois de um ensaio deve-se, previamente, garantir a libertação de qualquer tipo de pressão interna que lá possa existir;

-Se da explosão resultar algum material que expluda em chamas este material pode ficar aderido à parede após o teste de modo que na sua abertura já não haja chamas possa ser removido em segurança;

-Amostras tóxicas e produtos reativos devem ser manuseados com cuidado.

3.2. Análise experimental

A análise experimental das partículas em estudo, foi feita com recurso à câmara esférica presente no Laboratório de Termodinâmica, que se encontra no DEMUC.

Para realizar a experiência é necessário gerar a suspensão das poeiras e com recurso a uma fonte de ignição, inflamá-las, de modo que se possa avaliar a pressão que resulta desse ensaio.

Este equipamento apresenta um volume de 23,9 l e é feito para suportar grandes pressões. É constituído por duas esferas ocas, uma responsável por conter a explosão (esfera interior) e outra por dissipar o calor resultante do ensaio através da passagem de água à sua volta (esfera exterior).

O material a ser testado é pressurizado no recipiente para poeiras e através da abertura de uma electroválvula, a poeira é injetada na câmara de explosões onde ocorre também a sua dispersão, através de um dispersor. Uma vez que a esfera interior se encontra em vácuo. Posto isto, recorrendo a uma fonte de ignição, neste caso uma descarga de corrente eléctrica causada por uma bateria sobre duas cargas presentes em localizações opostas no centro da esfera.

Para controlar este procedimento conta-se com a presença de elementos de controlo:

- Sensor de pressão
- Condicionador de sinal
- Unidade de controlo das electroválvulas e descarga eléctrica



Figura 3.1 - Câmara de explosão onde se realizaram os ensaios localizado no DEMUC

3.2.1. Câmara de explosão

A câmara de explosão possui um volume de 23,9 l e é constituída por duas esferas concêntricas para que seja possível passar água no seu interior com o propósito de refrigerar a câmara, isto porque após uma explosão esta aquece, possibilitando a redução da temperatura e assim os ensaios possam realizar-se com a mesma temperatura inicial.

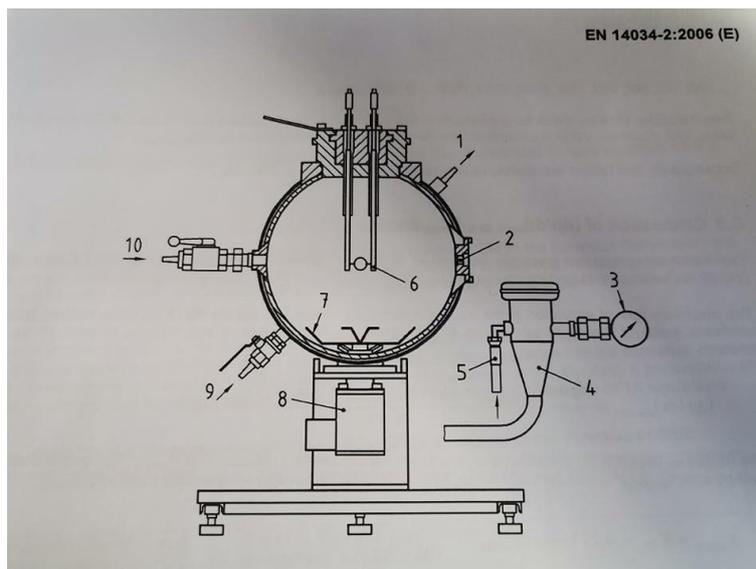


Figura 3.2 - Câmara de explosão (Norma EN 14034-2:2006)

- 1- Saída de água
- 2- Sensor de pressão
- 3- Manómetro
- 4- Recipiente de pó (0,6 dm³)
- 5- Entrada de ar
- 6- Fonte de ignição
- 7- Bocal de recuperação
- 8- Electroválvula
- 9- Entrada de água
- 10- Saída de ar

3.2.2. Fonte de ignição

A fonte de ignição é feita segundo a norma EN 14034-1:2004 (E). É composta por dois ignidores com uma energia de 5 KJ cada. Cada um tem uma massa de 1,2 g. Dessa quantidade 40% é zircónio, 30% de nitrato de bário e os restantes 30% de peróxido de bário.

Estes ignidores são colocados no centro da câmara e estão direcionados para lados opostos de forma que a explosão ocorra de forma o mais uniforme em toda a câmara. São ativados através de uma bateria com uma voltagem de 12 V. Uma das vantagens de usar este tipo de ignidores é o facto de reagirem num tempo muito curto quando solicitado pela corrente (cerca de 10 ms).

3.3. Procedimento experimental

Como foi dito anteriormente os ensaios devem ocorrer com as mesmas condições, com o intuito de poderem ser comparados com os resultados que são obtidos noutras experiências. Daí, primeiramente a temperatura no interior da câmara deve ser registada. Só depois disso e sabendo que o ensaio vai ocorrer a uma temperatura semelhante é que se pode começar o processo. Após esta verificação a amostra que se pretende testar deve ser colocada no recipiente de poeiras que de seguida é pressurizado a uma sobrepressão de 20 bar. Para garantir uma pressurização eficaz o volume da amostra deve ser inferior a 75% do volume

do recipiente onde é colocado. Caso isto aconteça pode ocorrer uma má dispersão da poeira dentro da câmara o que leva a que os resultados possam ser diferentes do pretendido.

A câmara após a injeção do material a testar deve encontrar-se à pressão atmosférica (pressão em que ocorrem as explosões numa situação real).

Ao longo da experiência são obtidos os valores para a pressão ao longo do tempo, obtendo-se assim uma curva $\frac{\partial p}{\partial t}$ (pressão/tempo) possibilitando assim descobrir a pressão máxima (p_{ex}) que atinge a explosão. Destacar que entre a entrada da amostra para a câmara e a explosão irá existir um atraso (t_v) de aproximadamente $0,06 \pm 0,01$ s.

Caso os resultados para as mesmas densidades apresentarem valores com 10% ou mais de diferença os sensores devem ser inspecionados e as experiências devem ser realizadas novamente.

Por fim a câmara deve ser limpa de modo que seja removida a escória resultante do ensaio.

Este ensaio é controlado por um equipamento elétrico que contém temporizadores, com funções distintas e essenciais para que as explosões ocorram como é suposto. São três os temporizadores que lá se encontram. O primeiro tem como objetivo fechar a electroválvula que liga o recipiente que contém a poeira para que este se encontre na sua totalidade dentro da câmara. O segundo temporizador cria uma descarga elétrica para que o ignidor seja ativado dando-se assim combustão e o terceiro desliga o sistema elétrico logo após a explosão realizada.



Figura 3.3 - Quadro elétrico de controlo (DEMUC)

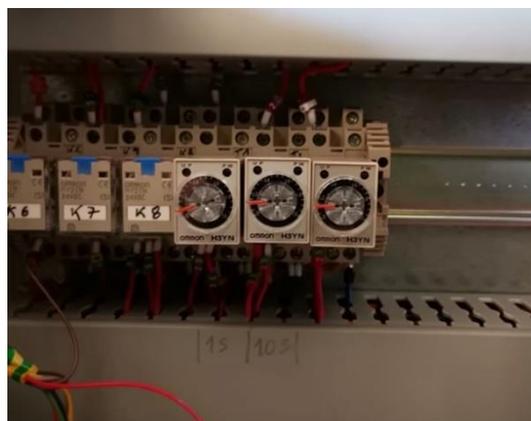


Figura 3.4 - Temporizadores do quadro elétrico de controlo

O quadro elétrico é constituído por dois botões que levam a cabo os ensaios. No botão designado por “Pressurizar reservatório” cria-se, no interior do recipiente de pó, uma sobrepressão de 20 bar. De seguida a injeção do pó é feita quando se aciona o segundo botão, “Injeção de pó”.

Por fim, antes de dar início a descarga elétrica o programa é iniciado e recolhe os dados relativos à pressão que serão posteriormente tratados e analisados no “Excel”. O equipamento que transmite os valores relativos à pressão para o computador é um Sistema de aquisição de dados multicanal da “National Instruments”, ligado diretamente a um amplificador de carga que está ligado ao sensor de pressão. A figura 3.5 representa o amplificador de carga (PLB – Model 484B11), onde no lado direito pode-se constatar que se usou o modo “AC”. Neste modo a informação do sinal é AC (capacitor) acoplada de um transdutor de +9 V a +12 V e alimentado através de um amplificador. A constante de tempo neste modo é de 10 segundos e é independente da carga de saída. Relativamente ao modo “DC”, o sinal é diretamente transmitido da potência do transdutor, e alimentado pela variação de níveis de carga e só depois para o amplificador. A constante de tempo deste modo não é comprometida podendo ser utilizado para longos tempos e para calibração. Só deve ser usado em ambientes estáveis.

Para o nosso sensor de pressão o “BIAS” encontrava-se na posição do 11 V.



Figura 3.5 - Amplificador de carga (PLB – Model 484B11)

3.4. Correção da pressão máxima

A pressão máxima, p_{max} , obtida em reservatório fechado é independente do volume da câmara (quer seja ela esférica ou cúbica). No centro desse reservatório deve existir uma fonte de ignição. Para que ocorra ignição da poeira, a pressão no interior deve atingir um valor de 0,5 bar acima da pressão atmosférica, daí termos:

$$p_i \geq 0,5 [bar] \Rightarrow p_{ex} \geq p_i + 0,5 [bar]$$

As correções de pressão são necessárias, visto que para valores superiores a 5,5 bar devido a menor proporção em relação ao volume faz com que os valores medidos sejam inferiores aos valores medidos numa câmara de 1 m³ que resulta como efeito do arrefecimento. Já para valores inferiores a 5,5 bar devem ser utilizadas as equações uma vez que os ignidores vão ter grande impacto e por isso podem deturpar os resultados. Dito isto, de maneira a corroborar os ensaios obtidos numa câmara de 1m³ torna-se imprescindível o uso destas equações (EN14034-1:2004).

Para valores de $p_{m\acute{a}x} \geq 5,5 bar$ devido a efeitos de arrefecimento temos:

$$p_{m\acute{a}x} = 0,775 \times p_{m\acute{a}x,20L}^{1,15} [bar] \quad [1]$$

Caso $p_{m\acute{a}x} < 5,5 [bar]$, uma vez que a esfera possui um volume relativamente baixo (20 L) a pressão dos ignidores deve ser tida em consideração, daí termos:

$$p_{m\acute{a}x} = \frac{5,5 \times (p_{m\acute{a}x,20L} - p_{ci})}{(5,5 - p_{ci})} [bar] \quad [2]$$

$$p_{ci} = \frac{1,6 \times E_i}{10000} [bar] \quad [3]$$

O máximo valor determinado para a subida de pressão $(dp/dt)_{m\acute{a}x}$ depende do volume, isto é, quanto maior o volume menor vai ser a subida de pressão, porém não significa que a explosão tenha menos intensidade, uma vez que para a mesma concentração iremos ter uma maior quantidade de combustível presente na mistura. O valor de $K_{m\acute{a}x}$ ou K_{st} exprime a relação do $(dp/dt)_{m\acute{a}x}$ com o volume (V) (EN14034- 2:2006). Temos assim:

$$k_{m\acute{a}x} = k_{st} = (dp/dt)_{m\acute{a}x} \times V^{\frac{1}{3}} [bar.m.s^{-1}] \quad [4]$$

Para o estudo experimental a realizar temos uma câmara com um volume de 23,9 L, pelo que substituindo na equação anterior temos:

$$k_{m\acute{a}x} = k_{st} = (dp/dt)_{m\acute{a}x} \times 0,288 [bar.m.s^{-1}] \quad [5]$$

Através do valor obtido na equação anterior podemos estabelecer comparação com os valores do k_{st} da tabela seguinte e aferir da severidade da explosão.

Classe	$k_{st} [bar.m/s]$
St 0	0
St 1	$> 0 \text{ e } \leq 200$
St 2	$> 201 \text{ e } \leq 300$
St 3	> 300

Tabela 2 – Valores correspondentes de cada classe atendendo ao valor do k_{st}

A abreviação “St” tem origem na palavra alemã “Staub” que significa pó. Para a classe St 0 não há ocorrência de explosão, St 1 ocorre uma explosão fraca, na classe St 2 trata-se de uma explosão forte e por fim a classe St 3 que representa as explosões mais fortes, ou seja, de maior severidade. Importa referir que, este valor para ser obtido, o pó em estudo tem de ser testado em câmaras geométricas de forma que a raiz cúbica do volume seja coerente.

4. ANÁLISE DE RESULTADOS E CALIBRAÇÃO

4.1. Curva de pressão

A curva de pressão obtidos na análise de explosividade de poeiras são muito características, isto porque têm muitos detalhes a ter em conta.

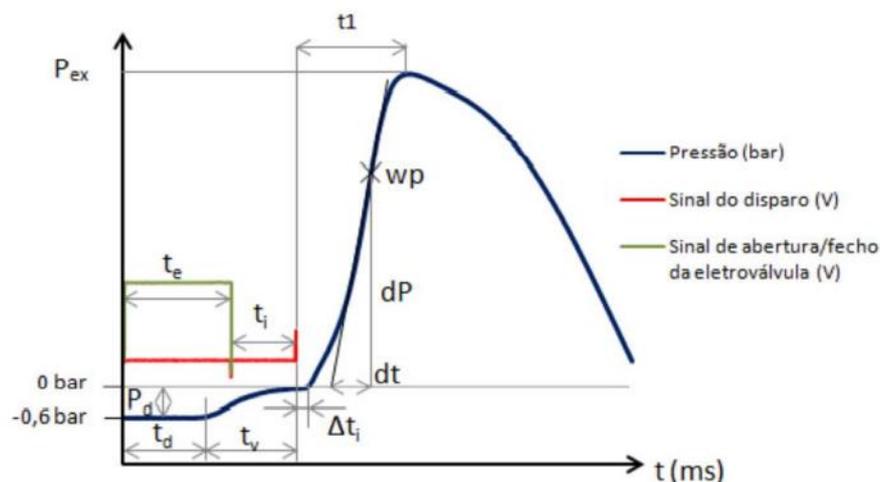


Figura 4.1 – Curva de pressão característica de um ensaio de explosividade (Sousa, 2013)

Como se pode observar na figura 4.1. a numa fase inicial a câmara encontra-se com uma pressão inferior a pressão atmosférica, que resulta do processo de vácuo a que a câmara é sujeita antes da injeção da poeira a ser testada. Como já foi dito, anteriormente, é fundamental que isto aconteça caso contrário a câmara iria apresentar uma sobrepressão no momento da ignição. No final do intervalo t_d a electroválvula que liga o recipiente em que se encontra o pó e a câmara é aberta, ocorrendo deste modo a injeção, colocando a câmara a pressão atmosférica (variação representada por P_d). De seguida temos o intervalo t_v que representa a ignição das cargas pirotécnicas e o Δt_i que é intervalo entre a ativação do ignidor e a explosão do mesmo. Após isto a pressão dispara, resultado da combustão, até atingir o seu valor máximo (P_{ex}) e por fim a pressão volta ao seu valor inicial que é a pressão atmosférica.

De notar também o intervalo t_e que representa a abertura e o fecho da electroválvula que permite a injeção da poeira e o intervalo t_i que nos dá o tempo entre o fecho da electroválvula anterior e a ordem de disparo do ignidor.

Os gráficos obtidos nos ensaios realizados vão possuir uma ligeira diferença quando comparados com a figura 4.1, dado que a pressão só começou a ser registada a partir do

momento do fecho da electroválvula daí na fase inicial não ser apresentada uma pressão inferior.

4.2. Explosão causada pelos ignidores

Os ignidores também são responsáveis por uma parte do aumento de pressão, no entanto, no nosso caso de estudo pretende-se descobrir a severidade da reação das microsferas de polímero expancel e não destes, de maneira a que deve-se verificar e analisar o impacto que os ignidores irão ter nos testes das microsferas, para que durante a análise das curvas de pressão possa-se descobrir o aumento da pressão que corresponde à propagação da chama ao longo da nuvem e não o aumento da pressão devido à carga pirotécnica que tem como objetivo ser a fonte da ignição. Assim sendo, a solução passa por realizar o ensaio apenas com a descarga elétrica inserindo apenas os ignidores sem a injeção das microsferas.

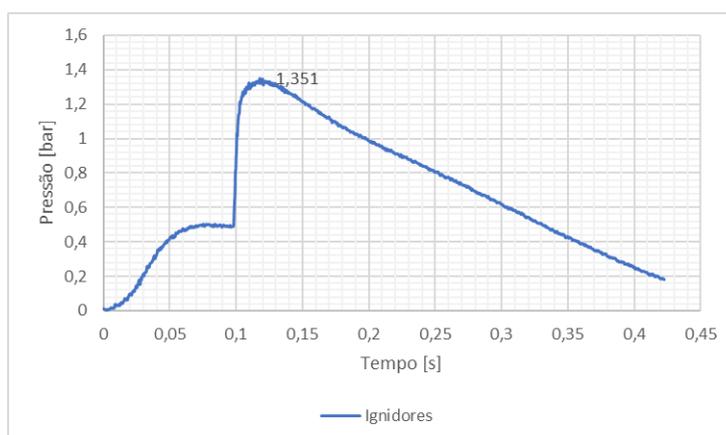


Figura 4.2 – Curva de pressão máxima obtida com apenas as cargas pirotécnicas

Obteve-se assim a pressão máxima que a explosão do ignidor atinge quando é solicitado que corresponde a aproximadamente 1,4 bar, mas este valor pode variar bastante, pelo que na análise dos resultados relativos às microsferas, é necessário analisar a curva e tirar um valor aproximado da pressão que provém dos ignidores. Ou seja, olhando de forma grosseira a esta situação todo o aumento de pressão que surgir a partir deste valor será causado pela inflamação instantânea da nuvem de poeira que se encontre na câmara de explosão, valor esse que se pretende descobrir. Dito isto, a resolução deste entrave passa por

utilizar as equações de correção que se encontram no capítulo 3.4. de notar que este resultado não provém todo do ignidor uma vez que parte do aumento inicial até 0,5 bar é o efeito da injeção do ar que se encontra em sobrepressão no depósito de poeiras. Com isto, o ignidor contribuiu nesta explosão 0,9 bar.

Também se pode obter o valor da diferença de pressão ao longo do tempo para este caso, todavia este valor não vai ter qualquer repercussão no estudo do aumento de pressão que deriva da combustão das microsferas, isto porque vão ser independentes, isto é, o ignidor vai ter efeito sobre a pressão máxima, mas não terá efeito no aumento de pressão relativo à nuvem.

Portanto este valor de pressão que foi obtido por este ensaio deverá ser retirado às pressões máximas nos resultados com as microsferas de modo a determinar o impacto que estas realmente tiveram na evolução da pressão.

Como se pode ver na Figura 4.2 dá para perceber que o sinal não é linear, em outras palavras, apresenta uma espécie de ruído. Tal acontece, dado que o sensor recebe um valor de pressão a cada 0,0002 s, que permite apanhar qualquer variação por mais pequena que seja. Com o intuito de “eliminar” este ruído, quando é determinada a variação da pressão, esta não será feita entre apenas três tempos, mas sim por um maior número de tempos, possibilitando a obtenção de resultados mais realistas para o estudo. Uma vez que a diferença entre os pontos é tao pequena, optou-se por determinar o valor do declive através de 20 tempos consecutivos.

4.3. Resultado da explosão das microsferas

Estes testes foram realizados com 4 concentrações diferentes sendo estas 31,25 g/m³, 62,5 g/ m³, 125 g/ m³ e 250 g/ m³. Para estas concentrações teve-se de determinar a massa que se deveria colocar do recipiente de poeiras. Os resultados obtidos no que toca à pressão máxima são 3. Um deles é o valor máximo que é obtido pelo sensor e os outros dois são resultado de uma análise da curva de pressão em que se subtrai o aumento de pressão devido aos ignidores e o outro através das equações de correção do capítulo 2.6.

No que diz respeito à variação de pressão como já foi dito é obtido anteriormente é obtido de forma que o ruído seja eliminado e através do programa Excel, é tirado o seu valor máximo.

Por fim com o objetivo de classificar a severidade da explosão calcula-se o valor do k_{st} pela equação [5] e classificada recorrendo a tabela 2.1.

4.3.1. Ensaio para uma concentração de 31,25 g/m³

Para esta concentração obteve-se uma pressão máxima de 1,8 bar. A este valor subtraindo a pressão causada pelos ignidores que foi aproximadamente de 0,7 bar (retirada a olho nu) foi de 1,1 bar e utilizando as equações temos uma pressão de 0,4 bar. Falando da variação de pressão, obteve-se um aumento máximo de 28,1 bar.s⁻¹ e substituindo na equação [5] o k_{st} teve um resultado de 8,1 bar.m.s⁻¹. Com base na tabela 2.1 a explosão é de classe St 1.

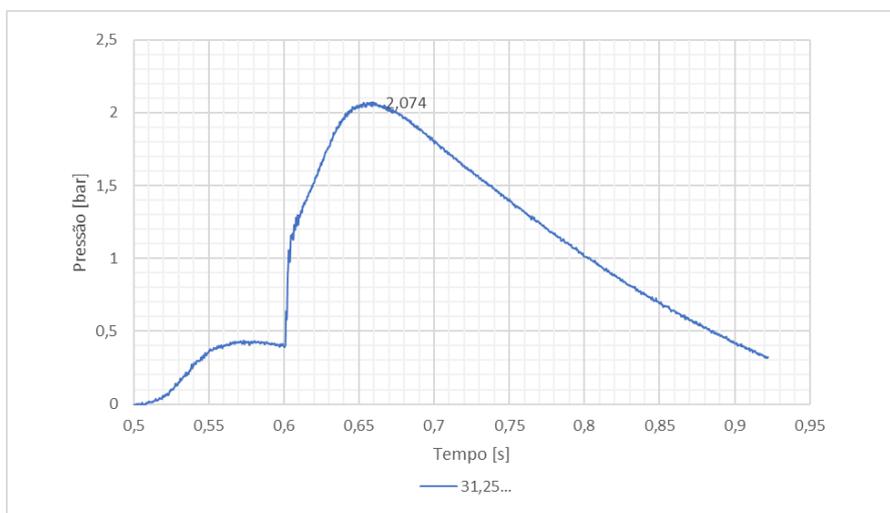


Figura 4.3 - Curva de pressão para uma concentração de 31,25 g/m³

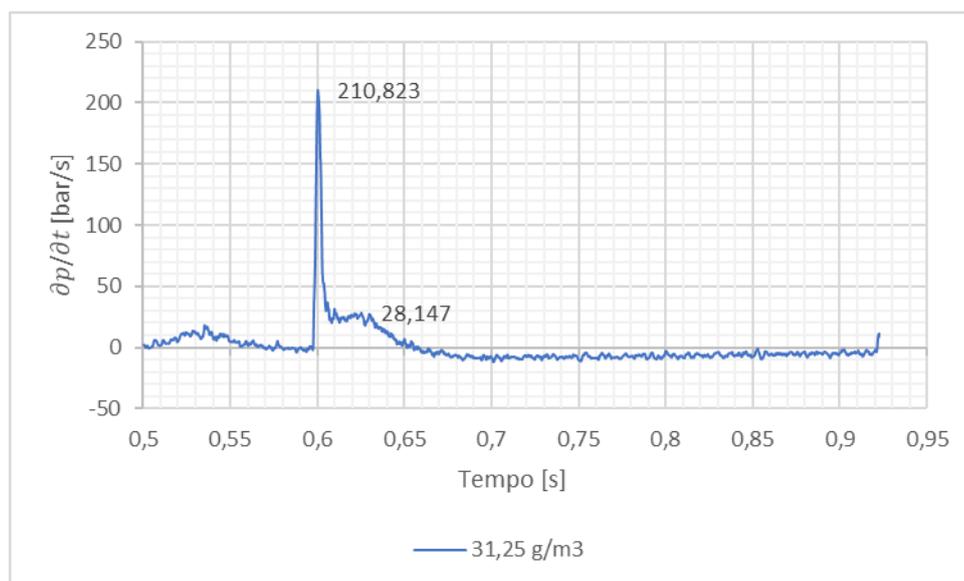


Figura 4.4 – Curva de taxa de aumento de pressão para uma concentração de 31,25 g/m³

À primeira vista observando a figura 4.4 dir-se-ia que o valor máximo da variação da pressão seria de 210,8 bar.s⁻¹, no entanto este valor representa o maior valor para as cargas pirotécnicas e não para as microsferas daí ter de se tirar outro valor que realmente represente o comportamento da combustão do material em estudo.

4.3.2. Ensaio para uma concentração de 62,5 g/m³

Este aumento de concentração foi acompanhado também com uma subida dos outros valores em estudo, sendo que para esta concentração a pressão atingiu um valor de 4,0 bar, sem a influência dos ignidores que tomaram um valor de 0,7 bar, obteve-se 3,3 bar e efetuando as correções obteve-se um resultado de 3,3 bar. A variação da pressão, assim como o valor de pressão aumentou de forma significativa obtendo-se deste 129,8 bar.s⁻¹. Com isto o k_{st} foi e 37,4 bar.m.s⁻¹ que insere esta concentração na mesma classe que a concentração e 31,25g/m³ (St1).

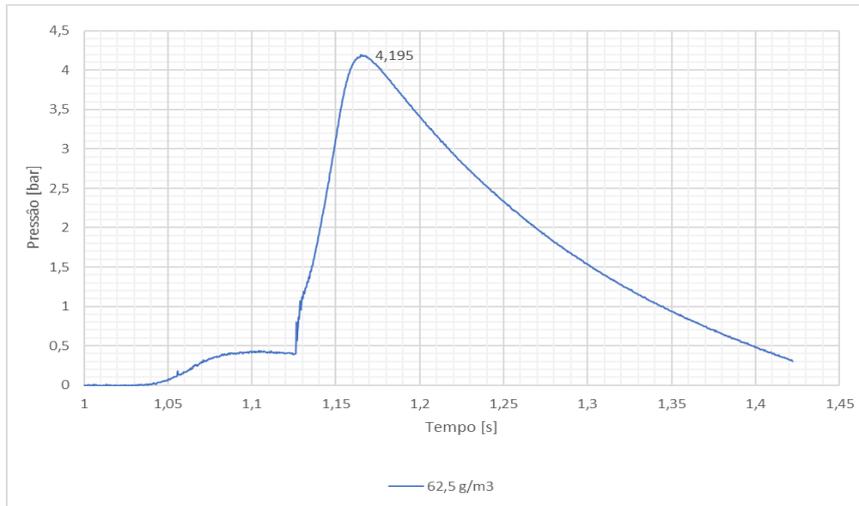


Figura 4.5 -Curva de pressão para uma concentração de 62,5 g/m³

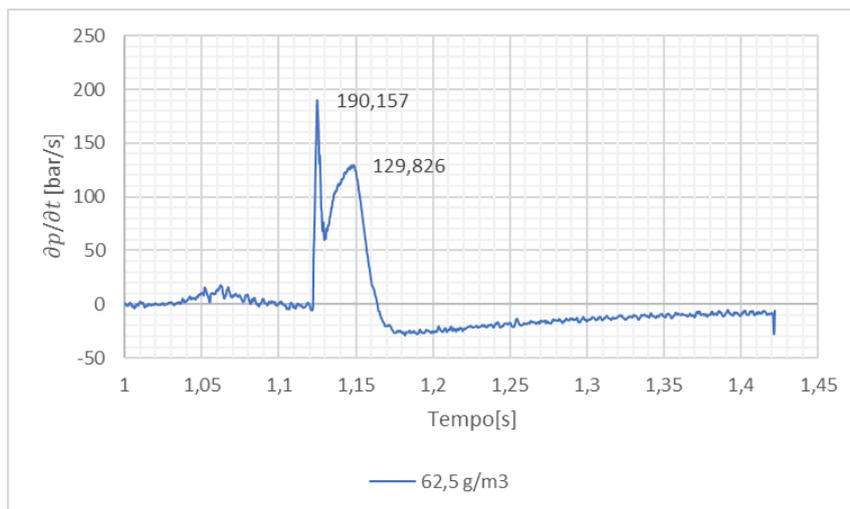


Figura 4.6 - Curva de taxa de aumento de pressão para uma concentração de 62,5 g/m³

Assim como na concentração anterior a variação de pressão é maior na altura de ativação dos ignidores do que na propagação da chama na nuvem criada na câmara.

4.3.3. Ensaio para uma concentração de 125 g/m³

As diferenças que se deram nestes ensaios foram bastante relevantes, uma vez que a esta explosão ultrapassou o valor de 5,5 bar. A pressão atingiu um máximo de 6,6 bar e a influência da carga foi de 1,0 bar advindo daí uma pressão de 5,6 bar. Com recurso às equações de correção deu-se uma pressão de 6,8 bar, valor acima do que foi estimado pelo sensor. O aumento de pressão conduziu a uma subida bastante considerável da variação da pressão até um máximo de 504,7 bar.s⁻¹ o que implica que esta explosão seja da classe St 1 com um k_{st} de 145,4 bar.m.s⁻¹, aproximando-se deste modo cada vez mais da classe seguinte, ou seja, com o aumento das concentrações as explosões estão cada vez mais severas.

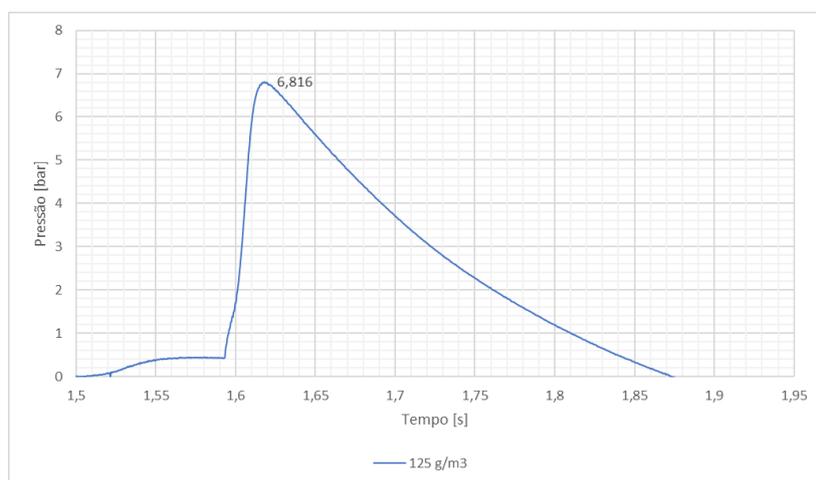


Figura 4.7 - Curva de pressão para uma concentração de 125 g/m³

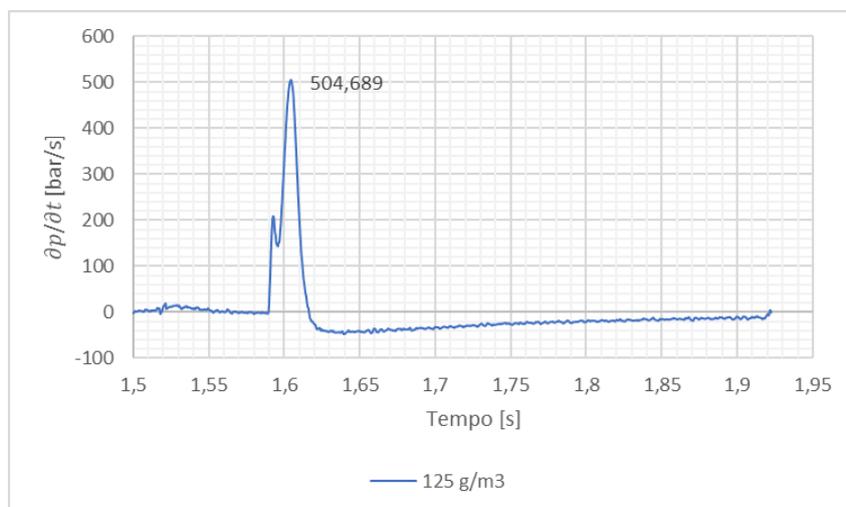


Figura 4.8 - Curva de taxa de aumento de pressão para uma concentração de 125 g/m³

Note-se que, ao contrário do que foi possível observar na figura 4.7 a curva da variação de pressão atinge o seu máximo na reação de combustão da nuvem de poeira presente na câmara e não na ignição das cargas utilizadas para a o mesmo efeito.

4.3.4. Ensaio para uma concentração de 250 g/m³

Esta concentração foi a mais severa e disto resultou a atribuição de uma classe de explosão superior às restantes. O valor de pressão máxima obtida pelo sensor foi de 7,3 bar e estima-se que as cargas tiveram um impacto de 1,0 bar neste resultado dando origem a uma pressão de 6,3 bar. O valor encontrado na correção com recurso às equações foi de 7,6 bar. Relativamente ao aumento de pressão, subiu consideravelmente quando comparado aos restantes, neste caso de 810,4 bar.s⁻¹ e um valor do k_{st} de 233,4 bar.m.s⁻¹ o que leva a que esta explosão se encontre na gama de explosões classificada St 2.

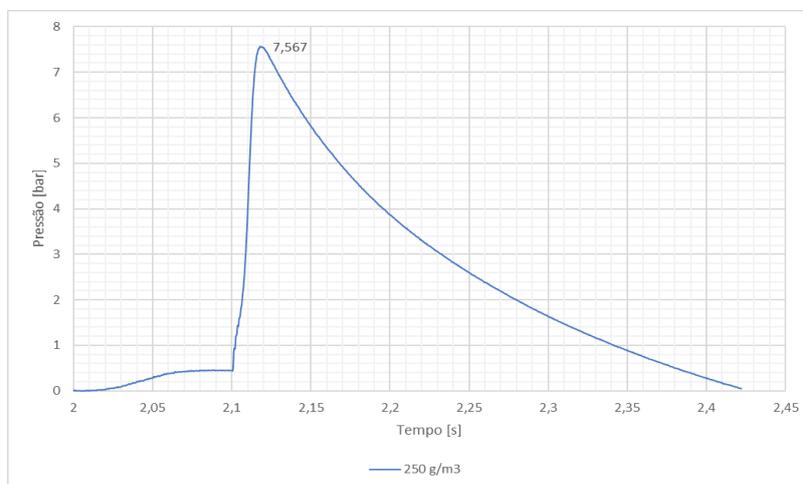


Figura 4.9 - Curva de pressão para uma concentração de 250 g/m³

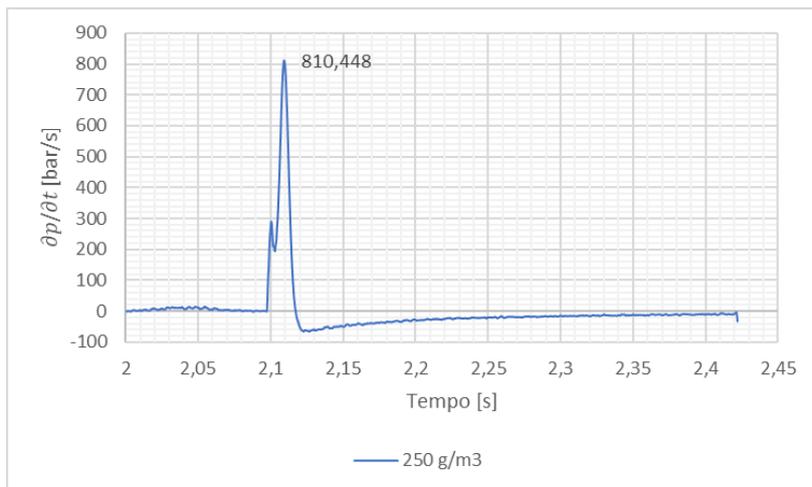


Figura 4.10 - Curva de taxa de aumento de pressão com uma concentração de 250 g/m³

Como constatado a maior concentração foi a que atingiu os maiores valores e para concentrações maiores estes valores relativos às explosões têm tendência a tomar maiores resultados e, portanto, serão cada vez mais perigosas.

4.4. Comparação de resultados

A partir dos resultados obtidos, para as mesmas condições e para o mesmo material o aumento de concentração provoca um aumento da severidade da explosão. Como já foi dito as pressões e variações de pressão registadas foram com concentração de 250 g/m^3 , este aumento foi muito significativo uma vez que as microsferas atingiram uma classificação St 2 o que indica que este material para além de ser bastante leve logo com uma capacidade de suspensão muito grande pode originar explosões bastantes perigosas e causar danos materiais significativos e pôr em risco qualquer pessoa que se encontre nas proximidades.

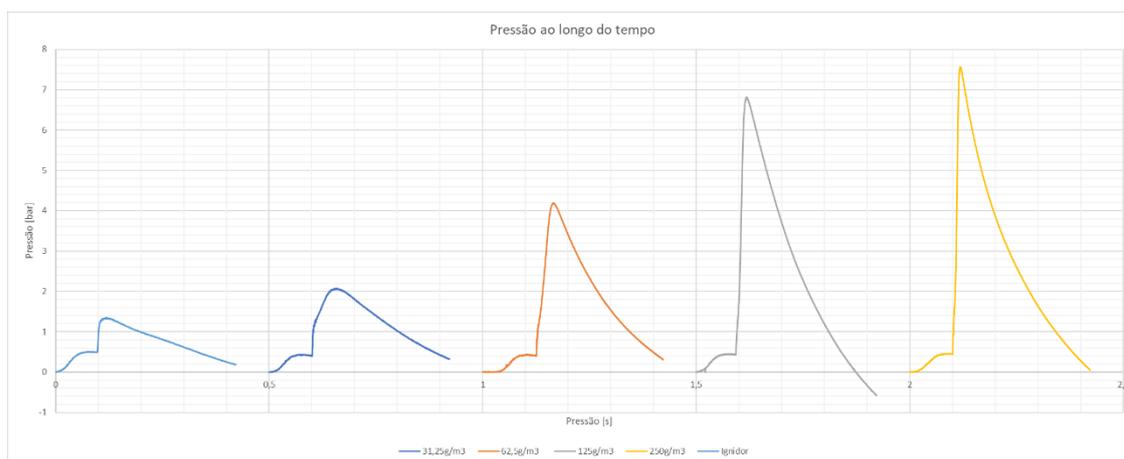


Figura 4.11 - Curvas de pressão obtidas para as concentrações utilizadas nos ensaios

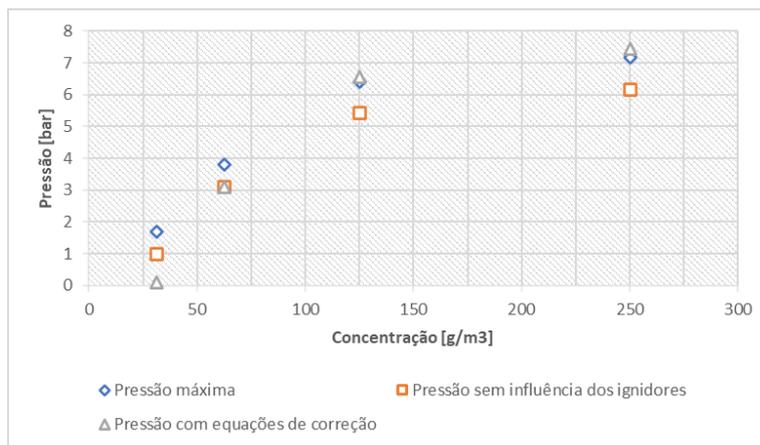


Figura 4.12 - Comparação dos resultados obtidos para a pressão nas diferentes concentrações

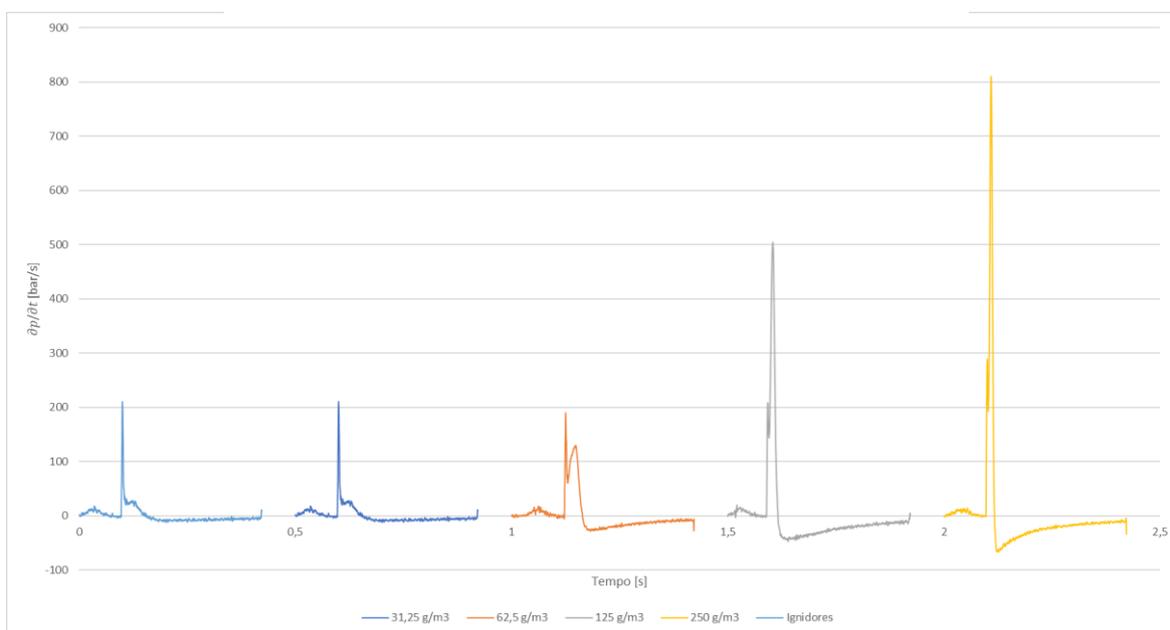


Figura 4.13 - Curvas do aumento de pressão ao longo do tempo para as diferentes concentrações utilizadas

Da mesma maneira como aconteceu com as pressões, a variação de pressão aumentou também significativamente, uma vez que para atingir pressões cada vez maiores para um tão curto espaço de tempo seria impossível sem que houvesse incremento nos valores da variação de pressão ($\frac{\partial p}{\partial t}$). A variação de pressão atinge dois picos notórios durante os testes. Um destes corresponde ao momento em que ocorre a ignição das cargas e outro máximo ajustado à propagação da chama no interior da câmara de explosão. Era de se prever que as cargas apresentassem o mesmo valor de pressão e de variação da mesma, porém isso não se

pode verificar, visto que se obtiveram gráficos com pequenas variações nesse aspeto. Isto pode ter a ver com o facto de nem toda mistura dos ignidores reagir. Enquanto que a chama vai ser mais intensa e propagar-se de forma mais rápida pela câmara e possuir maior homogeneidade da nuvem, pode levar a que aquando a carga reaja, reaja também uma parte da nuvem instantaneamente, daí para maiores concentrações, estes valores podem induzir em erro, fazendo com que pareça que os ignidores têm um maior impacto na variação do aumento de pressão do que aquele que realmente têm. Já o parâmetro influenciado por esta variação de pressão (o k_{st}) aumento gradual de tal forma que para o mesmo pó, para concentrações diferentes resultaram duas classificações de explosão sendo que uma delas é considerada perigosa.

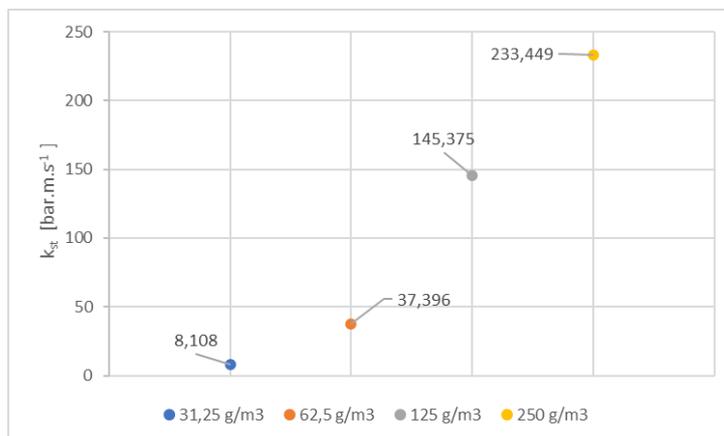


Figura 4.14 – Valores do k_{st} obtidos para os ensaios nas diferentes concentrações

4.5. Calibração

De forma a testar os resultados obtidos pelo sensor de pressão máxima, realizou-se um conjunto de testes com amido de milho e comparou-se os resultados com os obtidos por Tascón (2016). Optou-se por realizar ensaios em que as densidades fossem de 250 g/m³, 500 g/m³ e 750 g/m³. Os resultados obtidos relativos à pressão máxima, pressão corrigida, taxa de variação de pressão e k_{st} encontram-se na tabela 3:

Amido de milho					
Concentração [g/m ³]	Ensaio	Pressão Máxima [bar]	Pressão corrigida [bar]	$(\partial P/\partial t)_{m\acute{a}x}$ [bar/s]	k_{st} [bar.m/s]
250	1	5	4,8	148,8	33,9
	2	4,6	4,2	197,9	57
500	3	6,4	6,6	444,1	127,9
	4	5,7	5,7	387,9	111,7
	5	5,5	5,5	375,3	108,1
750	6	6,1	6,2	450,6	129,8
	7	5,8	5,9	547,4	131,7

Tabela 3 - Tabela resumo dos resultados do amido de milho

No ensaio 5, destacado a vermelho na Tabela 3, feito para uma densidade de 500 g/m³, observou-se um valor de pressão abaixo do expectável (5,5 bar) quando comparado com os valores medidos por Tascón et al.,2016. Isto deveu-se uma vez que o amido de milho (farinha Maizena) não reagiu na sua totalidade e uma outra porção não chegou sequer a entrar na câmara de explosão, o que contribuiu para essa pressão baixa. As imagens 4.15 e 4.16 provam o que se sucedeu nesse ensaio em que se pode confirmar que no recipiente de poeiras, parte do amido de milho não deu entrada e este também se “colou” às paredes interiores da câmara de explosão e não reagiu.

Através da figura 4.15 nota-se que uma grande quantidade do amido de milho não reagiu. Isto é só uma parte do que não contribuiu para a evolução da chama, visto que após o ensaio a parede interior estava esbranquiçada (amido de milho depositado).



Figura 4.16 - Depósito de amido de milho nas paredes interiores que não reagiu durante a explosão



Figura 4.15 - Interior do recipiente de poeiras após o ensaio

A figura 4.15 demonstra o que foi dito anteriormente em que não houve uma injeção total do pó a ser estudado, concluindo assim que o resultado obtido não é adequado para uma concentração de 500 g/m³, visto que se uma porção significativa não deu entrada na câmara de explosão.

Com o intuito de eliminar a água presente nas amostras procedeu-se à secagem do amido de milho. De maneira a calcular a quantidade de água do amido de milho colocou-se na estufa 20,000 g de amido de milho durante 21 horas a 55°C e no dia seguinte esta amostra foi pesada de novo, desta vez com 18,465 g. Isto significa que a quantidade de água que se evaporou foi de 1,645 g, que corresponde a aproximadamente 8,2% do peso. Este fator tem como consequência uma menor temperatura da explosão e com isso a pressão de explosão. Para além disso após a secagem essa coesão apesar de ainda existir, já não tinha tanta intensidade facilitando a injeção do pó na câmara de explosão. Os restantes ensaios realizados do amido de milho foram realizados com amostras secas (sem a presença dos 8,2% de água).

4.5.1. Testagem do amido de milho

Os resultados que se obtiveram para as pressões serem relativamente mais baixas isto pode ter surgido devido a condições experimentais diferentes das condições presentes no laboratório, quer pelas diferenças no amido de milho que foi testado. Estas diferenças na amostra podem ser bastante notórias na presença de humidade (apesar do tratamento de secagem a que foi sujeita), mas também ao tamanho da partícula. Uma das outras causas que estão na origem desta discrepância de resultados pode advir da temperatura inicial, que tem impacto na quantidade de oxigénio por unidade de volume, todavia pequenas variações desta condição não irão refletir grande impacto no resultado final (Tascón et al., 2016). De qualquer das formas o comportamento, em termos de evolução das pressões e da evolução desta ao longo do tempo foram similares, isto é, subiu consideravelmente de 250 g/m³ para 500 g/m³ e estabilizou de 500 g/m³ para 750g/m³. Para cada uma das concentrações referidas foram realizados dois ensaios, encontrando-se de seguida os gráficos correspondentes aos primeiros e no Anexo A os restantes.

4.5.1.1. Ensaio para 250 g/m³

Das concentrações para as quais se colocou o amido de milho em prova foi a que obteve uma pressão de explosão de 5,2 bar e utilizando as equações de correção 5,1 bar, com uma taxa máxima de variação de pressão de 148,8 bar/s, dando a um k_{st} da ordem dos 33,9 (bar.m)/s. O segundo ensaio por sua vez, deu lugar a uma pressão máxima de 4,8 bar, 4,5 bar depois de corrigido com uma taxa de variação de pressão de 197,9 bar/s. o k_{st} foi assim de tomou o valor de 57,0 (bar.m)/s (St1).

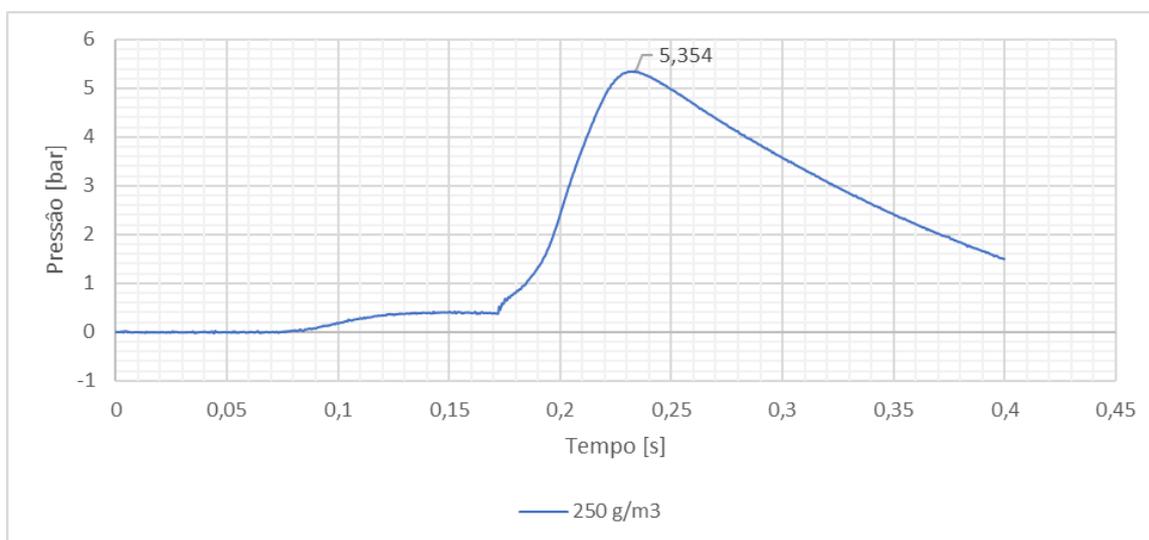


Figura 4.17 - Curva de pressão para uma concentração de 250 g/m³

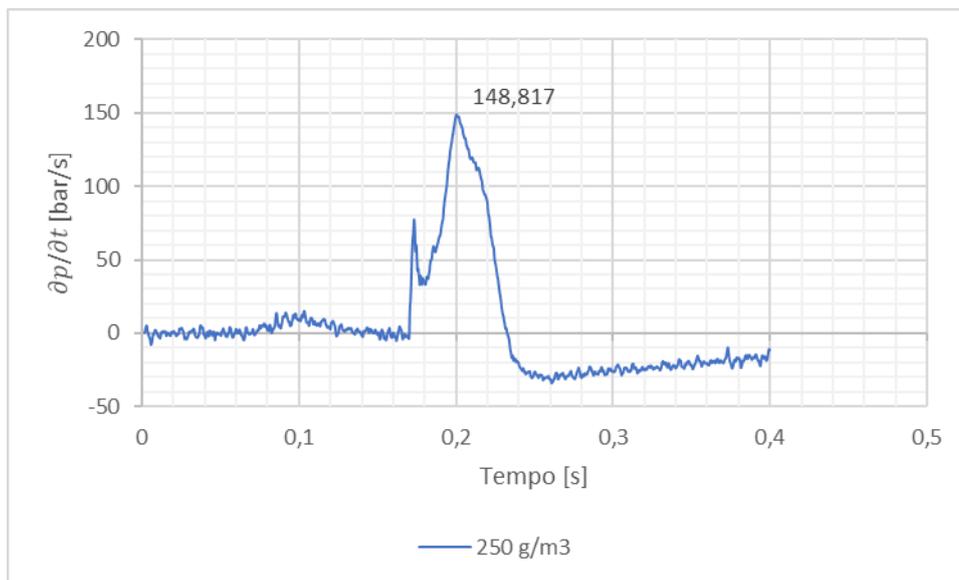


Figura 4.18 – Curva de taxa de aumento da pressão para uma concentração de 250 g/m³

4.5.1.2. Ensaio para 500 g/m³

Para este valor de concentração o amido de milho gerou aqui a sua pressão máxima de todos os ensaios com uma pressão de explosão de 6,6 bar e utilizando as equações de correção 6,8 bar, com uma taxa máxima de variação de pressão de 444,1 bar/s, dando a um k_{st} da ordem dos 127,9 (bar.m)/s. O segundo ensaio por sua vez, deu lugar a uma pressão máxima de 5,9 bar, 6,0 bar depois de corrigido com uma taxa de variação de pressão de 387,9 bar/s. O k_{st} tomou assim um valor de 111,7 (bar.m)/s (St1).

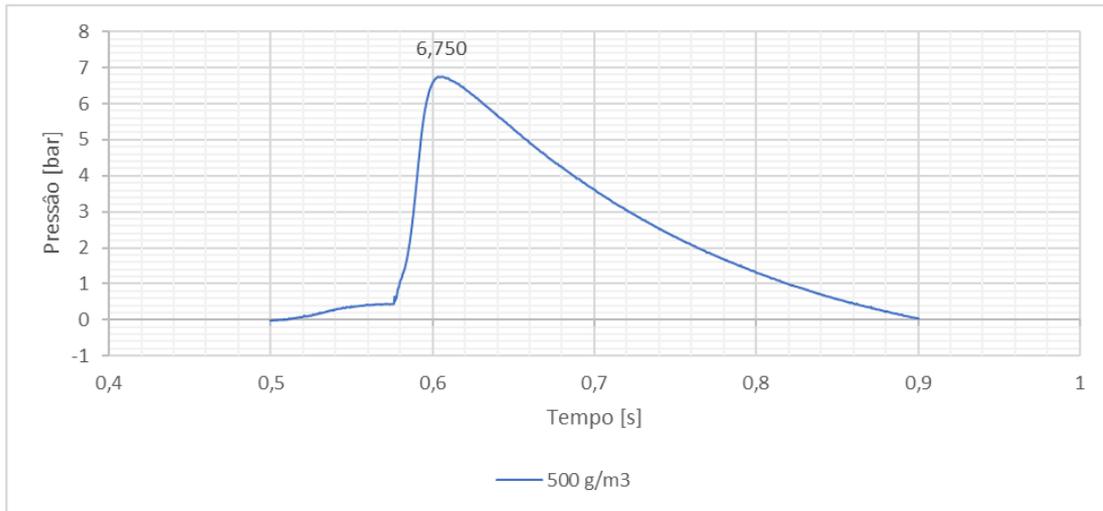


Figura 4.20 - Curva de pressão para uma concentração de 500 g/m³

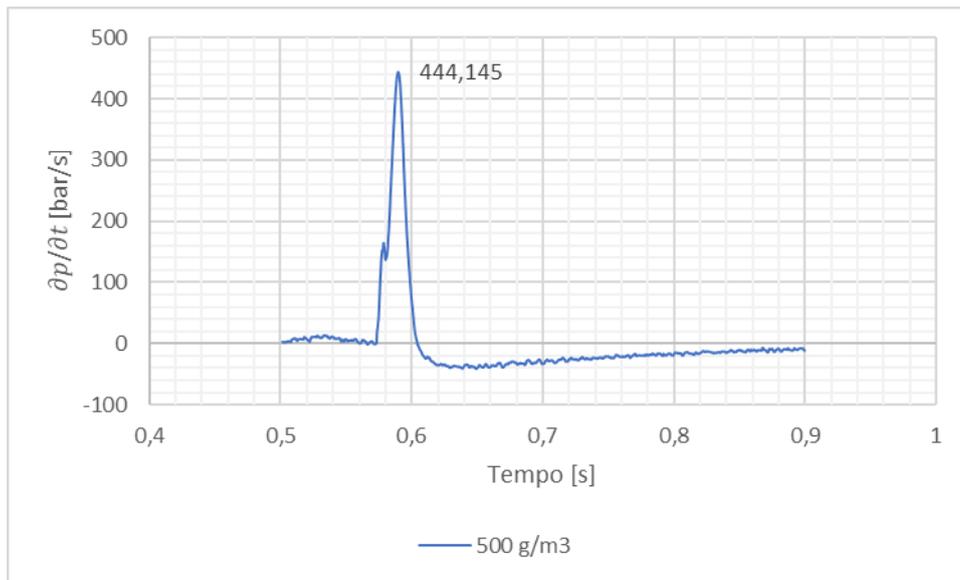


Figura 4.19 – Curva de taxa de aumento da pressão para uma concentração de 500 g/m³

4.5.1.3. Ensaio para 750 g/m³

Neste caso foi notória uma estabilização dos resultados que, mesmo com uma concentração maior a pressão desceu ligeiramente para 6,3 bar e utilizando as equações de correção, 6,4 bar. O máximo valor do aumento de pressão foi praticamente idêntico com 450,6 bar/s, obtendo assim um k_{st} de 129,8 (bar.m/s). Apesar de ter uma pressão de explosão maior não implicou que possuísse um maior máximo para aumento de pressão que pode ter origem na maior quantidade de amostra presente na nuvem criada na câmara. Já o segundo ensaio criou uma pressão máxima de 6,2 bar, 6,1 bar depois de corrigido com uma taxa de variação de pressão de 457,4 bar/s. o k_{st} foi assim de tomou o valor de 131,7 (bar.m)/s (St1).

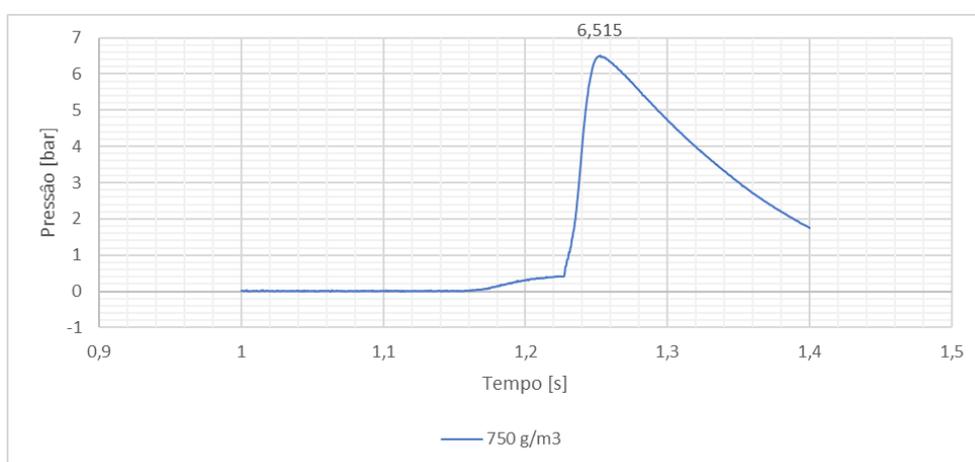


Figura 4.22 - Curva de pressão para uma concentração de 750 g/m³

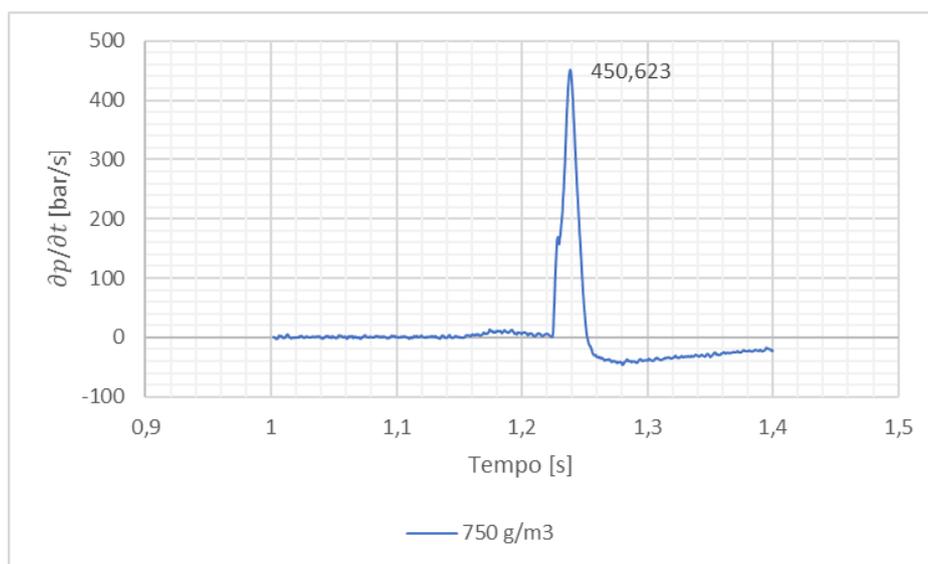


Figura 4.21 – Curva de taxa de aumento da pressão para uma concentração de 750 g/m³

4.5.1.4. Análise de resultados

Nos resultados recolhidos por Tuscán (2016) observou-se uma evolução muito idêntica aos ensaios efetuados com recurso à câmara de explosão do Laboratório de Termodinâmica do DEMUC. As imagens seguintes apresentam os resultados obtidos após utilizar as equações de correção e nota-se essa similaridade no aumento das concentrações de 250 g/m^3 até 750 g/m^3 . Em anexo encontram-se os restantes gráficos que correspondem aos segundos ensaios complementares para as diferentes concentrações.

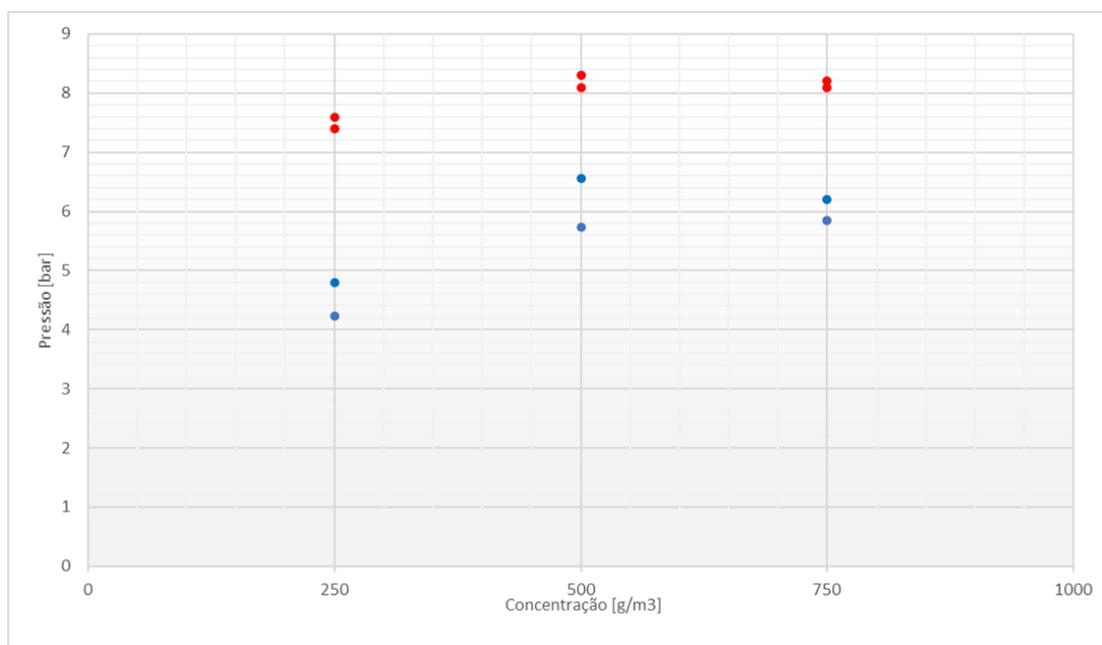


Figura 4.23 - Evolução da pressão dos ensaios realizados no DEMUC (azul) vs Tascón et al., 2016 (vermelho)

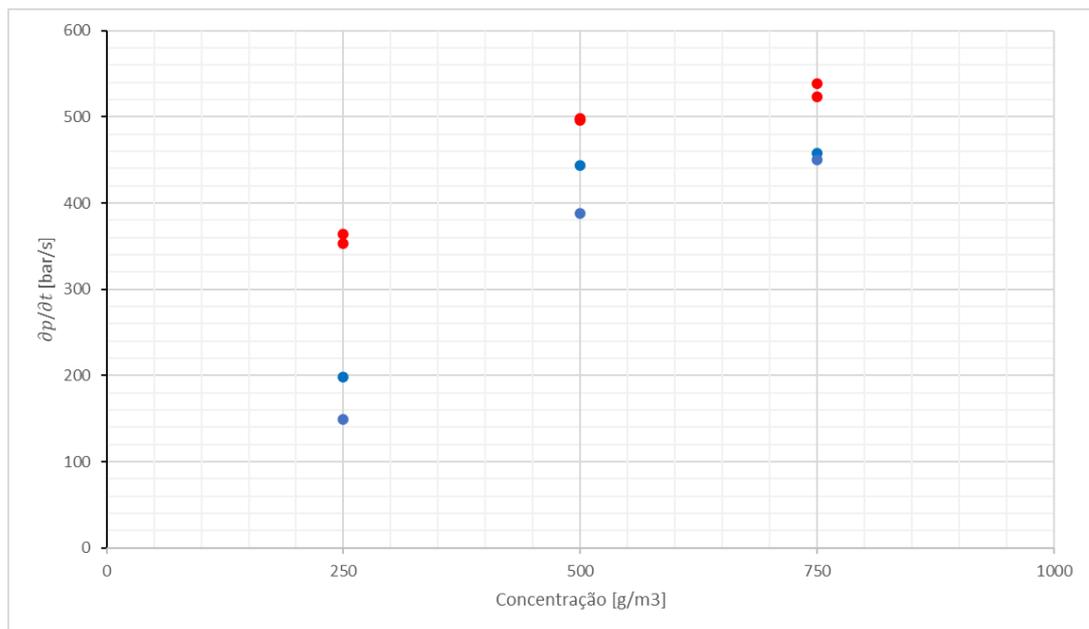


Figura 4.24 - Evolução do valor máximo do aumento de pressão dos ensaios realizados no DEMUC (azul) Vs Tascón et al.,2016 (vermelho).

5. CONCLUSÃO

Neste capítulo são apresentadas as conclusões obtidas no decurso do trabalho realizado que consistiu na análise das características de explosividade de poeiras poliméricas e de amido de milho.

Foi realizado um trabalho de calibração da camara e da cadeia de medida com recurso ao amido de milho. Os testes foram realizados para concentrações entre os 250 g/m³ e os 750 g/m³. Para as concentrações de 250 g/m³ a 500 g/m³ observou-se uma subida significativa de pressão de aproximadamente 4,5 bar até 6,2 bar e o k_{st} entre 45,5 bar.m/s e 119,8 bar.m/s. De 500 g/m³ a 750 g/m³ o valor da pressão diminuiu relativamente à concentração anterior de 6,2 bar para 6,1 bar. O valor do k_{st} também estabilizou com valores aproximadamente de 119,8 bar.m/s até os 135,7 bar.m/s. No caso do amido de milho não se obteve nenhuma explosão de outra classe a não ser St1. No entanto para estas concentrações os valores de pressão de explosão obtidos por Tascón (2016) são superiores em 2 bar aos obtidos durante o presente trabalho.

Os resultados obtidos para as microsferas de polímero mostram que para uma variação de concentração de 31,25 g/m³ até 250 g/m³ a pressão de explosão variou de 1,7 bar a 7,2 bar e os valores do k_{st} variaram de um mínimo de 8,1 bar.m/s a um máximo de 233,4 bar.m/s. os valores de k_{st} para as concentrações de 31,25 g/m³ a 125 g/m³ correspondiam a explosões de classe St1 e para a concentração de 250 g/m³ a uma explosão de classe St2.

-Numa análise comparativa entre os resultados obtidos no DEMUC conclui-se que as microsferas Expancel têm um potencial para gerar explosões mais severas face ao amido de milho, apesar de as microsferas serem testadas para concentrações mais reduzidas o que comprova mais o risco a que se está sujeito.

-Uma vez que do amido de milho resultou resultados inferiores àqueles que seriam de esperar uma das propostas de trabalho seria procurar a razão desse acontecimento através de uma análise mais aprofundada das características do produto tais como a granulometria e

as condições em que são realizados os ensaios e as diferenças que estas provocam nos resultados finais que são apresentados.

-Uma outra sugestão é o estudo da pressão de expansão, dado que antes da injeção da poeira a câmara de explosão se encontrava a -0,6 bar e na análise das curvas de pressão era suposto subir 0,6 bar, coisa que não aconteceu. Para resolver esse problema a minha sugestão passa por colocar o recipiente e poeiras a uma pressão de sobrepressão superior aos nossos 20 bar.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2007a). Dust explosions-Cases, causes, consequences, and control. In *Journal of Hazardous Materials* (Vol. 140, Issues 1–2, pp. 7–44). Elsevier. <https://doi.org/10.1016/j.jhazmat.2006.11.007>
- Abbasi, T., & Abbasi, S. A. (2007b). Dust explosions–Cases, causes, consequences, and control. *Journal of Hazardous Materials*, 140(1–2), 7–44. <https://doi.org/10.1016/J.JHAZMAT.2006.11.007>
- Eckhoff, R. K. (2009). Understanding dust explosions. The role of powder science and technology. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(1), 105–116. <https://doi.org/10.1016/J.JLP.2008.07.006>
- Eckhoff, Rolf K. (2000). Design of electrical equipment for areas containing combustible dust: Why dust standards cannot be extensively harmonised with gas standards. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 13(3–5), 201–208. [https://doi.org/10.1016/S0950-4230\(99\)00030-3](https://doi.org/10.1016/S0950-4230(99)00030-3)
- Kosinski, P., & Hoffmann, A. C. (2005). Dust explosions in connected vessels: Mathematical modelling. *Powder Technology*, 155(2), 108–116. <https://doi.org/10.1016/J.POWTEC.2005.05.052>
- Liang, G., Dai, H., Yin, H., Zhao, Q., & Chen, X. (2021). Inhibition characteristics of coal dust explosion at the gasification atmosphere. *Advanced Powder Technology*, 32(10), 3725–3734. <https://doi.org/10.1016/J.APT.2021.08.026>
- Tascón, A., Ramírez-Gómez, Á., & Aguado, P. J. (2016). Dust explosions in an experimental test silo: Influence of length/diameter ratio on vent area sizes. *Biosystems Engineering*, 148, 18–33. <https://doi.org/10.1016/J.BIOSYSTEMSENG.2016.04.014>
- Yuan, Z., Khakzad, N., Khan, F., & Amyotte, P. (2015). Dust explosions: A threat to the process industries. *Process Safety and Environmental Protection*, 98, 57–71. <https://doi.org/10.1016/J.PSEP.2015.06.008>
- Zheng, Y. P., Feng, C. G., Jing, G. X., Qian, X. M., Li, X. J., Liu, Z. Y., & Huang, P. (2009). A statistical analysis of coal mine accidents caused by coal dust explosions in China. *Journal of Loss Prevention in the Process Industries*, 22(4),

528–532. <https://doi.org/10.1016/j.jlp.2009.02.010>

Sousa, P.M.B., Determinação de Parâmetros de Explosividade de Misturas C-ar e/ou C-O₂, Dissertação de Mestrado em Engenharia Mecânica, especialidade de Energia e Ambiente, Universidade de Coimbra, 2013.

BS EN 14034-1. (2004). Determination of explosion characteristics of dust clouds Part 1: Determination of maximum pressure P_{max} of dust clouds. 3.

BS EN 14034-2. (2006). Determination of explosion characteristics of dust clouds. Part 1: Determination of the maximum rate of explosion pressure rise (dp/dt)_{max} of dust clouds

ANEXO A

Neste anexo são expostos os restantes gráficos dos restantes ensaios do amido de milho para as concentrações de 250 g/m^3 , 500 g/m^3 e 750 g/m^3 respetivamente. As figuras representam as curvas de pressão e a taxa de aumento de concentração para cada uma das concentrações.

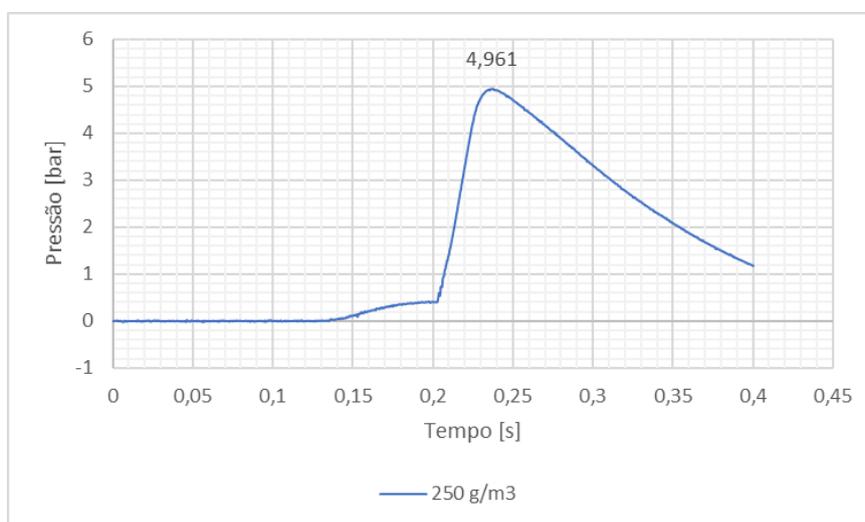


Figura 0.1 - Curva de pressão para uma concentração de 250 g/m^3

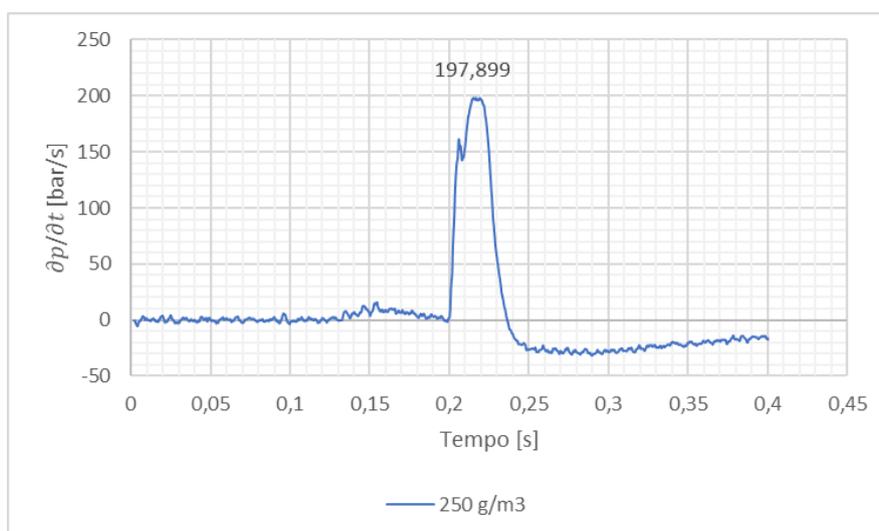


Figura 0.2 - Curva de taxa de aumento de pressão para uma concentração de 250 g/m^3

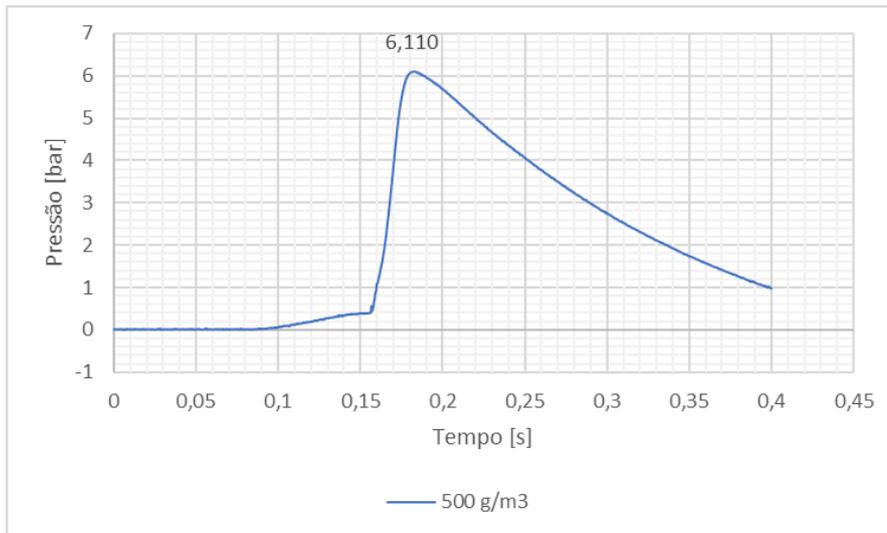


Figura 0.3 - Curva de pressão para uma concentração de 500 g/m³

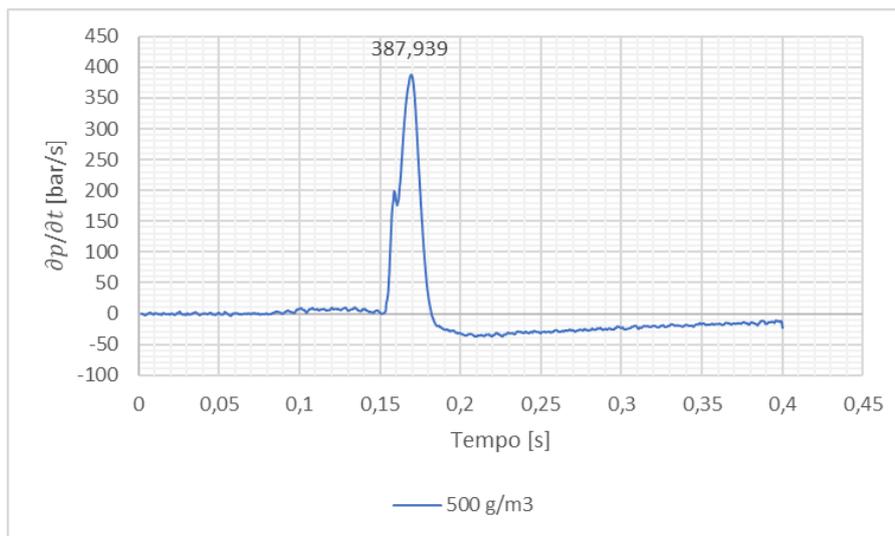


Figura 0.4 - Curva de taxa de aumento de pressão para uma concentração de 500 g/m³

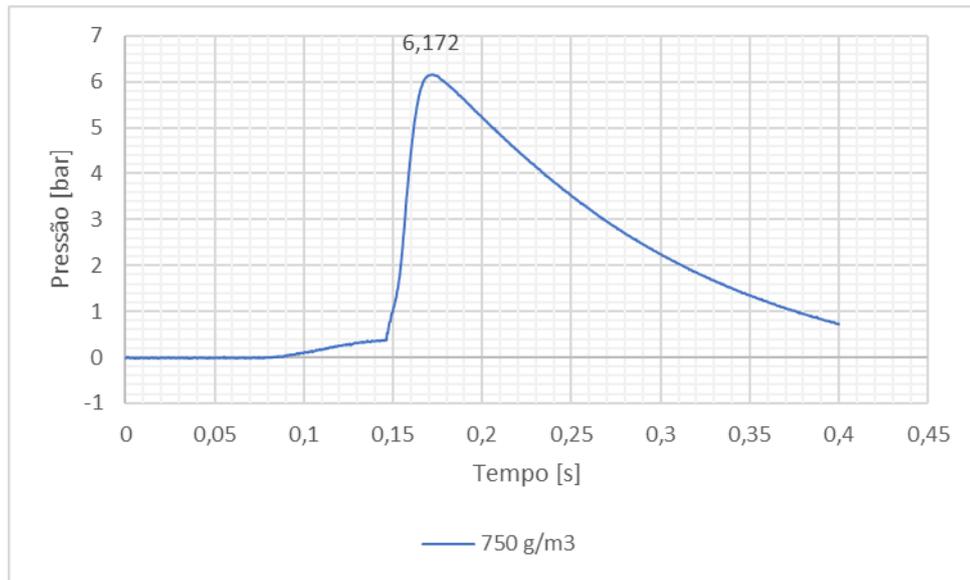


Figura 0.5 - Curva de pressão para uma concentração de 750 g/m³

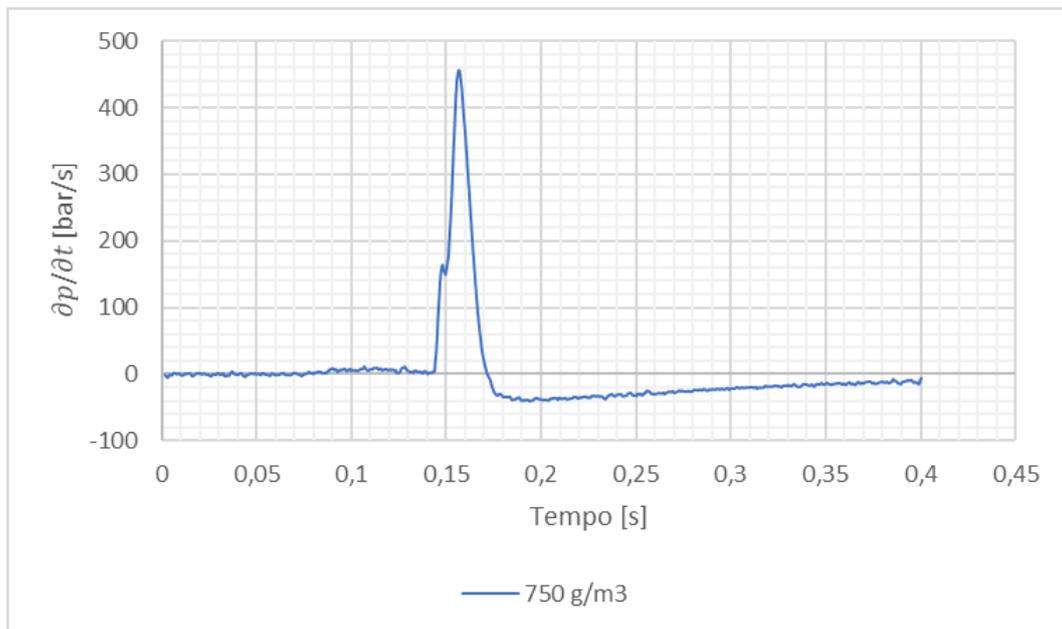


Figura 0.6 - Curva de taxa de aumento de pressão para uma concentração de 750 g/m³

ANEXO B

Neste anexo está representada a tabela que sumaria os resultados obtidos para todos os ensaios realizados para as microsferas de polímero Expancel.

Microsferas Expancel				
Concentração [g/m ³]	Pressão Máxima [bar]	Pressão corrigida [bar]	$(\partial P/\partial t)_{\text{máx}}$ [bar/s]	k_{st} [bar.m/s]
31,25	1,7	0,1	28,1	8,1
62,5	3,8	3,1	129,8	37,4
125,0	6,4	6,6	504,7	145,4
250,0	7,2	7,8	810,4	233,4

Tabela 4 - Tabela resumo dos resultados das microsferas Expancel