



FCTUC FACULDADE DE CIÊNCIAS
E TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE COIMBRA

DEPARTAMENTO DE
ENGENHARIA MECÂNICA

Compactação Dinâmica de Pós Metálicos

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

Autor

Bruno André Froufe Tavares

Orientadores

Maria Teresa Freire Vieira

Ricardo António Lopes Mendes

Júri

Presidente Professor Doutor José Manuel Baranda Moreira da Silva
Ribeiro
Professor da Universidade de Coimbra

Vogais

Professora Doutora Maria Teresa Freire Vieira
Professora Catedrática da Universidade de Coimbra
Professor Doutor Ricardo António Lopes Mendes
Professor Auxiliar da Universidade de Coimbra
Doutora Ana Sofia Figueira Ramos
Investigador Auxiliar da Universidade de Coimbra

Coimbra, Setembro, 2011

“A minha força reside apenas na minha tenacidade”

(Louis Pasteur)

Agradecimentos

Embora uma tese seja, pela sua finalidade académica, um trabalho individual, há contributos de natureza diversa que não podem e nem devem deixar de ser realçados. Por essa razão, desejo expressar os meus sinceros agradecimentos:

Ao **Professor Doutor Ricardo Mendes**, orientador da dissertação, pela competência com que orientou esta minha tese e o tempo que generosamente me dedicou transmitindo-me os melhores e mais úteis ensinamentos, com paciência, lucidez e confiança. Pelo acesso que me facilitou a uma pesquisa mais alargada e enriquecedora e pela sua crítica sempre tão atempada, como construtiva, bem-haja estou-lhe muito, muito grato.

À **Professora Doutora Teresa Vieira**, orientadora da dissertação, agradeço o apoio, a partilha do saber e as valiosas contribuições para o trabalho.

Um sentido agradecimento ao **Professor Doutor José Manuel Baranda** pelas suas breves, mas sábias indicações.

Aos meus colegas de gabinete, o **André** a **Rita Joana** e em especial a **Rita Farinha** pelas suas demonstrações de solicitude e disponibilidade.

Aos meus amigos de Coimbra e aos da Universidade, vocês sabem quem são.

Sou muito grato a todos os meus familiares pelo incentivo recebido ao longo destes anos.

Aos meus **Pais**, agradeço o tempo e o sorriso que me dedicaram. Sem vocês não tinha chegado onde cheguei.

À minha irmã **Marta**, obrigado pelo amor, alegria e atenção sem reservas...

O meu profundo e sentido agradecimento a todas as pessoas que contribuíram para a concretização desta dissertação, estimulando-me intelectual e emocionalmente.

Agradeço às seguintes Instituições pelo apoio, excelentes condições de trabalho que me proporcionaram e colaboração prestados, sem o qual não seria possível a concretização do trabalho de mestrado:

CEMUC Centro de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra
LEDAP Laboratório de Energética e Detónica

Resumo

A possibilidade de sinterizar aço inoxidável do tipo 316L a partir de pós micrométricos e da sua produção recorrendo à compactação por choque originada por detonação de uma carga explosiva são os fundamentos implícitos no desenvolvimento da presente dissertação.

O primeiro passo, do ponto de vista experimental, foi a caracterização do material de partida, a selecção e projecção das montagens experimentais usadas para o processamento dos pós. Para o estudo do processo de compactação foram realizados múltiplos ensaios recorrendo a dois tipos de configuração, nomeadamente cilíndrica e plana com coluna convergente de água.

Após este primeiro passo do trabalho experimental, foi desenvolvido uma metodologia experimental que possibilitou o acesso a informação sobre a propagação da onda de choque no referido material e à sua análise, procedendo de seguida à determinação das características mecânicas e microestruturais do material após explosão.

A metodologia, aplicada à caracterização da onda de choque, baseia-se na fotocronografização, com recurso a uma câmara de varrimento, do processo de propagação da onda, e faz uso de uma fita de fibras ópticas, com 250 μm de diâmetro cada, permite uma resolução temporal na ordem do nanossegundo e uma resolução espacial da ordem do micrómetro e envolveu a determinação experimental da velocidade de propagação da onda. A descrição dos dados experimentais resultantes, realizada com recurso ao modelo de Thouvenin e ao modelo de Hugoniot, mostrou-se eficaz.

A compactação por choque cilíndrico é feita através de pressões na ordem dos 16,8 GPa e apresentou compactos com elevada dureza, porosidade aberta inferior a 1%, enquanto a configuração plana revelou-se incapaz de consolidar o pó metálico devido à excessiva atenuação da intensidade da onda de choque durante o processo de compactação.

Palavras-chave: Compactação Dinâmica, Onda de Choque, Explosivo, Aço 316L, Thouvenin, Hugoniot.

Índice

Índice de Figuras	v
Índice de Tabelas	viii
Nomenclatura.....	ix
Simbologia.....	ix
Acrónimos	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. O estado actual da arte. Motivação e objectivos.....	1
1.2. Estrutura e Organização da Tese.....	2
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1. Processamento de pós	3
2.1.1. Conformação	3
2.1.2. Sinterização	4
2.2. Fundamentos da compactação por ondas de choque	4
2.2.1. Ondas de choque.....	5
2.2.2. Relações de transição.....	6
2.2.3. Equação de Estado.....	7
2.2.4. O caso particular dos materiais porosos	9
2.2.5. Interação entre ondas de choque.....	13
2.3. Compactação dinâmica de pós.....	15
2.3.1. Compactação por ondas de choque originadas por detonação de um explosivo	15
2.4. Material em estudo.....	18
2.4.1. Aço inoxidável.....	18
2.4.2. Aço austenítico tipo 316L.....	18
2.5. Preparação dos corpos-de-prova.....	19
2.5.1. Polimento dos materiais após explosão	19
2.5.2. Difracção de Raios X.....	20
2.5.3. Dureza.....	20
3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL	21
3.1. Materiais	22
3.2. Caracterização do pó.....	22
3.3. Processo de Compactação.....	23
3.3.1. Pré-compactação.....	23
3.3.2. Compactação dinâmica.....	23
3.3.3. Gerador de Ondas de Choque.....	24
3.3.4. Medição da velocidade de propagação da onda de choque	25
3.4. Estudo dos Compactos.....	27
3.4.1. Análise por Microscopia Óptica	27
3.4.2. Análise por difracção de Raios X.....	27
3.4.3. Medidas de densidade.....	27
3.4.4. Medidas de Ultramicrodureza	28
3.5. Caracterização das Ondas de Choque.....	28
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	29

4.1.	Caracterização do Pó de Aço 316L.....	29
4.1.1.	Distribuição de tamanho de partículas e massa volúmica.....	29
4.1.2.	Escoabilidade, Densidade Aparente e Batida.....	30
4.1.3.	Difracção de Raios X (DRX).....	30
4.2.	Caracterização do material após explosão.....	31
4.2.1.	Montagem Plana.....	31
4.2.2.	Montagem cilíndrica.....	35
4.3.	Caracterização das Ondas de Choque.....	40
4.3.1.	Resultados da THOMSON.....	41
a)	Configuração plana.....	41
b)	Configuração cilíndrica.....	42
4.3.2.	Propriedades da Onda de Choque.....	43
5.	CONCLUSÃO.....	51
6.	Referências bibliográficas.....	52
7.	Anexo A.....	54
8.	Anexo B.....	55
9.	Anexo C.....	59

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Efeito da pressão sobre a velocidade do som. O aumento do declive das curvas com o aumento de pressão implica uma diminuição da compressibilidade que corresponde ao aumento da velocidade do som Carton (1998)	5
Figura 2. Propagação da frente de uma onda finita, em regime permanente, com velocidade u_s , através de um meio inicialmente em repouso.....	6
Figura 3. Curva de Hugoniot para o cobre e o aço 316L no estado sólido e para a água no estado líquido, em três planos, calculadas a partir de dados experimentais, Marsh, 1980....	9
Figura 4. Representação esquemática do Modelo <i>Plate Gap</i> [Thouvenin, 1965].....	10
Figura 5. - Aplicação do modelo de Thouvenin no cálculo da velocidade de propagação da onda de choque e da velocidade particular, para o caso particular do cobre poroso com massa específica inicial de $3,007 \text{ g/cm}^3$. Resultados experimentais de Marsh, 1980.	12
Figura 6. Aplicação do modelo de Thouvenin, no cálculo da Curva de Hugoniot, P- u_p , para o caso particular do cobre poroso com uma massa específica inicial de $3,007 \text{ g/cm}^3$. Resultados experimentais Marsh, 1980.	12
Figura 7. Transmissão de uma onda de choque em um meio de impedância de choque superior.....	14
Figura 8. Transmissão de uma onda de choque em um meio de impedância de choque inferior.	14
Figura 9. Representação esquemática do processo de compactação utilizando uma configuração cilíndrica (a frente da OC está representada por uma linha vermelha) (Pruemmer, 1973).....	16
Figura 10. Diferentes tipos de defeitos que podem ocorrer na compactação por explosivos utilizando a configuração cilíndrica (Meyers e Wang, 1987).	17
Figura 11. Fluxograma do procedimento experimental.....	21
Figura 12. Representação esquemática da montagem experimental usadas nos ensaios de compactação dinâmica, ((a)-Montagem Plana, (b)-Montagem Cilíndrica)).	23
Figura 13. Vista frontal de um conjunto de fibras numa matriz de resina, ao microscópio óptico.	26
Figura 14. Representação esquemática da posição das Fibras Ópticas (FO), ((a)-Configuração Cilíndrica com pormenor das janelas nas sondas, (b)- Configuração Plana).	27
Figura 15. Diagrama relativo à distribuição do tamanho de partículas do pó de aço comercial Atmix SS.....	29
Figura 16. Difractograma do aço Atmix SS do tipo 316L (γ – austenite, δ – ferrite δ).	31
Figura 17. Fotografias exemplificativa dos compactos obtidos por explosão ((a)- Compacto relativo a MP2- seta preta a indicar a direcção da OC, (b)- Compacto relativo a MP3).....	32
Figura 18. Micrografias do aço 316L compactado dinamicamente, com recurso à configuração plana ((a)- Compacto relativo a MP2, (b)- Compacto relativo a MP3).	33
Figura 19. Difractogramas do aço 316L após detonação por explosão com recurso ao processo de configuração plana.	33
Figura 20. Diagrama da evolução dos valores de Dureza medidos em várias indentações.	34

Figura 21. Fotografia do tubo de ensaio após o processo de compactação (A – Corte 1, B – Corte 2, Seta – Sentido da velocidade de detonação).....	35
Figura 22. Fotografias exemplificativa dos compactos obtidos por explosão relativos a MC1 ((a)– Corte 1, superfície afastada da sonda (b)- Corte 2, superfície próxima da sonda).	35
Figura 23. Fotografias exemplificativa dos compactos obtidos por explosão relativos a MC2 ((a)– Corte 1, superfície afastada da sonda (b)-Corte 2, superfície próxima da sonda).	37
Figura 24. Micrografias com ampliações distintas da superfície dos compacto correspondente a MC1 ((a) – Sem ataque químico (b) - Com ataque químico)	37
Figura 25. Micrografias com ampliações distintas da superfície dos compacto correspondente a MC1 ((a) – Sem ataque químico (b) - Com ataque químico)	38
Figura 26. Difractogramas relativos a MC com identificação das fases presentes.	38
Figura 27. Diagrama da evolução dos valores de Dureza medidos em várias indentações	40
Figura 28. Fotocronograma típico do processo de propagação da onda de choque em água e no explosivo utilizado na configuração plana no terceiro ensaio (MP2).	41
Figura 29. Fotocronograma típico do processo de propagação da onda de choque em água e no explosivo utilizado na configuração plana no terceiro ensaio. (MP3)	42
Figura 30. Fotocronograma típico do processo de propagação da onda de choque na amostra do pó de aço do tipo 316L para um nível de sollicitação determinado pelo uso do gerador de ondas no primeiro ensaio com configuração cilíndrica (MC1).	43
Figura 31. Fotocronograma típico do processo de propagação da onda de choque na amostra do pó de aço do tipo 316L para um nível de sollicitação determinado pelo uso do gerador de ondas no primeiro ensaio com configuração cilíndrica (MC2).	43
Figura 32. Diagrama $x-t$ da propagação da onda de choque (nos últimos 2,75 mm) no explosivo obtido a partir do fotocronograma relativo ao ensaio MP2 apresentado na figura 28.	44
Figura 33. Diagrama $x-t$ da propagação da onda de choque (nos últimos 2,75 mm) no explosivo obtido a partir do fotocronograma relativo ao ensaio MP3 apresentado na Figura 29.	44
Figura 34. Variação da velocidade da onda de choque em função da distância percorrida.	45
Figura 35. Diagrama $x-t$ da propagação da onda de choque (nos últimos 5 mm) no explosivo obtido a partir do fotocronograma relativo ao ensaio MP2 apresentado na Figura 28.	46
Figura 36. Variação da velocidade da onda de choque em função da distância percorrida.	46
Figura 37. Variação da pressão da onda de choque em função da distância percorrida.	46
Figura 38. Representação esquemática da montagem com a indicação das interfaces presentes.	47
Figura 39. Método de adaptação de impedância aplicado à propagação da onda de choque da água para o cobre ($5,34 \text{ g/cm}^3$).	47
Figura 40. Pormenor do registo das linhas de luz aquando a passagem da frente de detonação pelas 5 janelas da sonda aplicada no ensaio MC2.....	48
Figura 41. Variação da velocidade da onda de choque em função da distância percorrida.	49
Figura 42. Frente de detonação e frente da onda de choque durante o processo cilíndrico de compactação	49

Figura 43. Forma da Onda de choque no contentor de pó ((a)- Pormenor da forma da frente da OC no registo do fotocronograma da figura 30 (b) –Medidas da forma da OC cónica convergente)	50
---	----

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável 316L.....	22
Tabela 2. Técnicas utilizadas na caracterização do pó.	22
Tabela 3. Plano experimental de ensaios (MP – Montagem Plana).	24
Tabela 4. Plano experimental de ensaios (MC- Montagem Cilíndrica).	24
Tabela 5. Tabela relativa aos testes de Escoabilidade do pó 316L, (D-diâmetro, P- passou, NP – não passou).	30
Tabela 6. Tabela relativa aos testes de densidade aparente e batida pó 316L.....	30
Tabela 7. Tabela de valores de dureza e de porosidade aberta relativa aos ensaios com montagem cilíndrica.	40

NOMENCLATURA

Simbologia

C_o	Celeridade do som	[mm/ μ s]
D	Velocidade de detonação	[mm/ μ s]
E	Energia Interna	[J]
P	Pressão	[GPa]
S	Coefficiente da equação (4)	[-]
T	Temperatura	[K; °C]
u_p	Velocidade Particular	[mm/ μ s]
U_s	Celeridade da onda de choque	[mm/ μ s]
V	Volume Específico	[cm ³ /g]
ρ	Massa Específica	[g/cm ³]
λ	Coefficiente da equação (5), inverso da porosidade, α	[-]
0	Montante da onda de choque –Não chocado	
1	Jusante da onda de choque –Chocado	

Acrónimos

CEMUC	Centro de Engenharia Mecânica da Universidade de Coimbra – Associação de Apoio
DMP	Densidade Máxima Teórica
DRX	Difracção de Raios X
LEDAP	Laboratório de Energética e Detónica – Associação de Apoio
MEOV	MicroEsfera Ocas de Vidro
MG	Micrografia
OC	Onda de Choque

1. INTRODUÇÃO

1.1. O estado actual da arte. Motivação e objectivos

O uso de energia dos explosivos, associado às técnicas de processamento de pós foi explorado para vários materiais industriais, tais como ligas de níquel, ligas de titânio, ligas de alumínio-lítio (Meyers et al., 1987) e ligas de titânio-sílica (Hokamoto et al., 2002). A possibilidade de realizar compactação dinâmica, com recurso a ondas de choque originadas a partir da detonação de uma carga explosiva, em pós metálicos tem sido sugerida por muitos investigadores. Em 2008, Farinha A. R. estudou a compactação dinâmica de pó de cobre micrométrico com recurso a uma montagem experimental com configuração cilíndrica e afirmou ter bons resultados. Manikandan P. e colaboradores (2010), relataram que a partir do mesmo processo mas com um tipo de configuração plana com coluna de água convergente, conseguiram boa consolidação de compósitos de Mg-SiC, afirmando ainda conseguirem medir a pressão da onda de choque em várias alturas da coluna de água com múltiplos ensaios.

O interesse do estudo do comportamento ao choque do pó metálico (aço 316L) passa por desenvolver em parceria com o LEDAP, uma metodologia experimental que possibilite o acesso a informação sobre o processo de propagação da onda de choque no referido material, proceder à sua análise, e de outra complementar, como a que resulta do trabalho laboratorial realizado nas instalações do CEMUC, determinar as características mecânicas e microestruturais do material de partida e do produto final.

A partir da análise exploratória realizada sobre o material em estudo, o aço inox 316L, descobriu-se um vasto leque de aplicações tecnológicas para este material, associadas às suas características mecânicas, em particular a alta resistência à corrosão, que passam pela aplicação em equipamentos de indústrias químicas, farmacêuticas e petrolíferas, em componentes usados na construção naval e em instrumentos cirúrgicos

O método de compactação é dinâmico e recorre à detonação de uma carga explosiva como processo gerador da onda de choque. Este processo é uma alternativa às sinterizações convencionais no processamento de pós metálicos devido à sua contribuição

para que não haja crescimento do tamanho de grão uma vez que através da detonação é possível alcançar pressões instantâneas elevadas, ocorrendo apenas um aumento localizado da temperatura.

1.2. Estrutura e Organização da Tese

A presente de dissertação encontra-se dividida em cinco capítulos, organizados de modo a reflectirem a sequência do trabalho realizado.

Assim, após este primeiro capítulo introdutório, onde é feita uma referência muito breve ao estado actual da investigação na área e onde são referidas as motivações e os objectivos do trabalho, segue-se o Capítulo 2 – Revisão Bibliográfica – onde é feita uma breve referência ao processamento de pós com especial atenção ao processamento utilizando ondas de choque resultantes da detonação de uma carga explosiva. Para além disso, é apresentada a teoria necessária para a compreensão dos princípios da compactação dinâmica e alguma informação útil sobre a matéria-prima e por último são explicadas as técnicas laboratoriais recorridas para a caracterização do material.

As etapas do trabalho experimental são descritas no Capítulo 3 – Metodologia Experimental – e engloba os materiais, as técnicas para a caracterização físico-química dos pós, os métodos utilizados no desenvolvimento experimental para obtenção dos sólidos e as técnicas de caracterização micro/macro estrutural e mecânica dos compactos com ou sem consolidação. Para além disso, as técnicas experimentais que foram idealizadas e realizadas com vista à obtenção de informação sobre o processo de propagação das ondas de choque nos materiais, é apresentado na secção final deste capítulo.

A discussão dos resultados finais é feita no Capítulo 4 – Discussão e Resultados – a divisão do capítulo é feita em secções correspondentes ao material em pó, ao material compacto após detonação do explosivo e por último à propagação da onda de choque.

Finalmente, no Capítulo 6 – Conclusão – é feita uma síntese dos principais contributos a todos os níveis, desde a metodologia seguida na abordagem do problema até aos resultados alcançados, passando pela técnica experimental utilizada.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

No presente capítulo é feita uma referência muito breve sobre o processamento de pós com especial atenção ao processamento a partir de ondas de choque resultantes de detonação. Posteriormente é apresentado a teoria necessária para a compreensão dos princípios da compactação por ondas de choque, onde são deduzidas e estabelecidas as bases teóricas do comportamento ao choque dos materiais condensados, limitadas ao mínimo necessário e indispensável à compreensão e análise crítica dos modelos de comportamento, também aqui apresentados. Por fim, serão introduzidos o material em estudo, e revistas as suas principais propriedades e, são explicadas todas as técnicas laboratoriais necessárias à caracterização dos materiais

2.1. Processamento de pós

Entende-se por processamento de pós a operação de transformação de uma certa quantidade de pó em um material maciço. Distingue-se dos processos tradicionais pela ausência de fase líquida durante a transformação do pó.

Esta evolução do pó pode ser dividida em duas etapas fundamentais: conformação ou compactação e consolidação ou sinterização.

2.1.1. Conformação

A conformação é realizada com aplicação de pressão nos pós, por intermédio de prensas de compressão, no interior de matrizes em que as cavidades correspondem normalmente à forma e dimensões das peças finais. Por tal, esta etapa é essencial para o sucesso do produto final. Os defeitos ocorridos nesta fase dificilmente serão eliminados. Então é fundamental que se obtenham pré-formas com densidade uniforme, e uma resistência suficiente para que possam ser manipuladas. Nesta fase deve ser evitada a formação de aglomerados de partículas, uma vez que este fenómeno induz problemas a quando a sinterização.

2.1.2. Sinterização

A sinterização tem vindo a ser altamente desenvolvida a nível industrial, e é o modo de consolidação mais utilizado na manufactura de materiais a partir de pós. É um processo termodinâmico, que consiste no aquecimento das peças compactadas a temperaturas específicas, sempre inferiores ao ponto de fusão do material base, (sinterização na fase sólida), em condições controladas de velocidade de aquecimento, tempo à temperatura, velocidade de arrefecimento e atmosfera de aquecimento, de modo que ocorram os seguintes processos: difusão, formação de uma fase viscosa ou fusão parcial. Este processo na realidade, baseia-se na ligação atómica entre superfícies de partículas vizinhas, através da redução da área superficial específica, levando à densificação e retracção volumétrica. Utilizando condições ideais ao material a sinterizar, é possível obter uma densidade final próxima de 100% DTM (densidade teórica máxima).

Como é de prever, ocorrem também fenómenos associados de recristalização e crescimento de grão, em função da temperatura e do tempo de sinterização. Com recurso aos métodos convencionais é então, impossível manter o tamanho de grão, quando se parte de pós submicrométricos, visto que o aquecimento prolongado dos materiais a altas temperaturas promove o crescimento de grão.

Como forma de avançar perante os problemas associados à sinterização convencional, diversas técnicas estão a ser estudadas actualmente. A sinterização com recurso a ondas de choque originadas por detonação de um explosivo, actualmente, é reconhecida como alternativa promissora para a consolidação de pós. Dada a importância para o presente estudo do processo de compactação dinâmica, será dada relevância a este assunto na presente revisão bibliográfica.

2.2. Fundamentos da compactação por ondas de choque

A teoria necessária para a compreensão dos princípios da compactação por ondas de choque será explicada neste subcapítulo. Os fenómenos da onda de choque (OC) são basicamente explicados utilizando materiais condensados – aqui entendidos como sólidos e líquidos. Contudo, os pós formam um meio único e as suas peculiaridades em relação às ondas de choque serão o assunto principal desta secção.

2.2.1. Ondas de choque

Em rigor, qualquer variação de pressão num ponto de um meio contínuo traduz-se por uma correspondente variação de massa volúmica e, portanto, da posição relativa das diferentes partículas.

As ondas de choque são fortes perturbações de pressão que ocorrem num meio. As suas velocidades de propagação são superiores à velocidade do som, c , no meio onde se desenvolvem. Isto resulta das propriedades da maioria dos materiais de transmitir o som a uma velocidade, $C_0 (= \sqrt{\partial P / \partial \rho})$, onde o declive da curva de pressão, P , em função da densidade, ρ , aumenta com a pressão depois de uma zona praticamente linear.

A pressão do meio comprimido diminui ao longo do tempo até à pressão atmosférica graças às ondas de expansão. As ondas de expansão propagam-se com a velocidade do som através do meio comprimido e aceleram as partículas do material no sentido contrário das ondas de choque. A densificação por ondas de choque é um processo termodinamicamente irreversível.

Por tudo o que foi escrito, as ondas de choque são consideradas a ferramenta base da densificação de pós por explosivos.

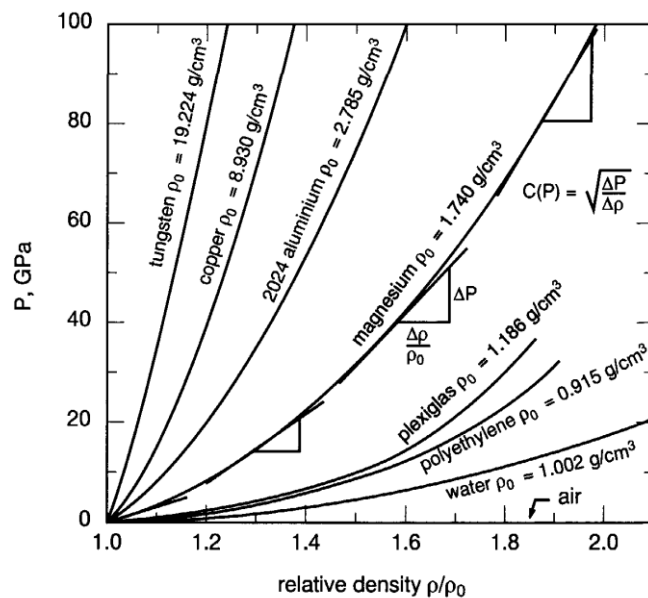


Figura 1. Efeito da pressão sobre a velocidade do som. O aumento do declive das curvas com o aumento de pressão implica uma diminuição da compressibilidade que corresponde ao aumento da velocidade do som
Carton (1997)

2.2.2. Relações de transição

Para determinar o estado do material após passagem da onda de choque, são necessárias equações que relacionem parâmetros como a pressão (P), energia interna (E), e o volume específico (V) ou a densidade (ρ) antes da onda de choque, com as mesmas quantidades na frente da onda, em função da velocidade da onda de choque (U_s) e da velocidade particular (u_p).

Para uma interpretação e análise das propriedades do meio após a passagem de uma onda de choque recorre-se às equações da conservação de massa, de energia e de quantidade de movimento, considerando uma onda de choque como uma propagação unidimensional num determinado meio material. Considera-se uma onda de choque plana que propaga-se em regime permanente, com uma certa velocidade na direcção do eixo dos xx , num meio em repouso. As leis de conservação são aplicadas em uma área, e em um período de tempo da propagação da onda de choque.

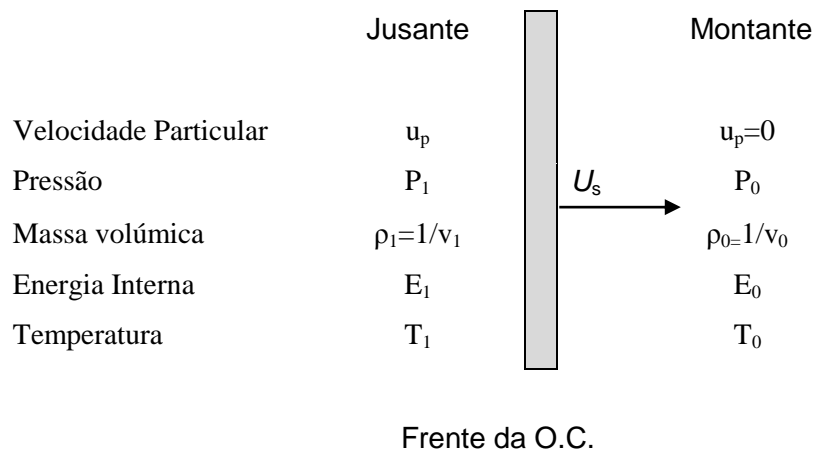


Figura 2. Propagação da frente de uma onda finita, em regime permanente, com velocidade u_s , através de um meio inicialmente em repouso.

As equações desenvolvidas são designadas por relações Rankine-Hugoniot, depois de dois investigadores as terem derivado. As equações, depois de integradas e de certos rearranjos matemáticos são representadas de seguida.

I. Conservação da massa:

$$\rho \times (U_s - u_p) = \rho_0 \times U_s \quad (1)$$

II. Conservação da quantidade de movimento:

$$P - P_0 = \rho_0 \times U_s \times u_p \quad (2)$$

III. Conservação da energia:

$$E - E_0 = \frac{(P_0 + P) \times (v_0 - v)}{2} \quad (3)$$

No entanto, estas três relações contêm cinco variáveis P , E , U_s , u_p , e ρ , portanto não são suficiente para determinar o estado do material após a passagem da OC, pelo que é necessário outra equação para se ficar apenas com uma variável independente.

2.2.3. Equação de Estado

A Equação de Estado caracteriza o comportamento dos materiais em que o choque se desenvolve. Em geral, é determinada experimentalmente e é a forma mais simples e correntemente mais utilizada. A sua representação gráfica é denominada por Polar de choque ou Curva de Hugoniot e relaciona duas das cinco variáveis atrás descritas. Então, determinando experimentalmente dois dos parâmetros, normalmente U_s e u_p , é possível calcular os restantes.

No final dos anos cinquenta, séries de experiências foram realizadas em vários metais, e foi descoberto que virtualmente todos esses metais exibiam uma relação linear entre a velocidade da onda de choque (U_s), e a velocidade particular (u_p) numa ampla gama de pressão. Então para a maioria dos materiais em processos de compressão por choque, que não envolvam transformações de fase ou reacções químicas, a função que melhor descreve a relação entre essas duas variáveis é linear [McQueen, 1970], ou seja:

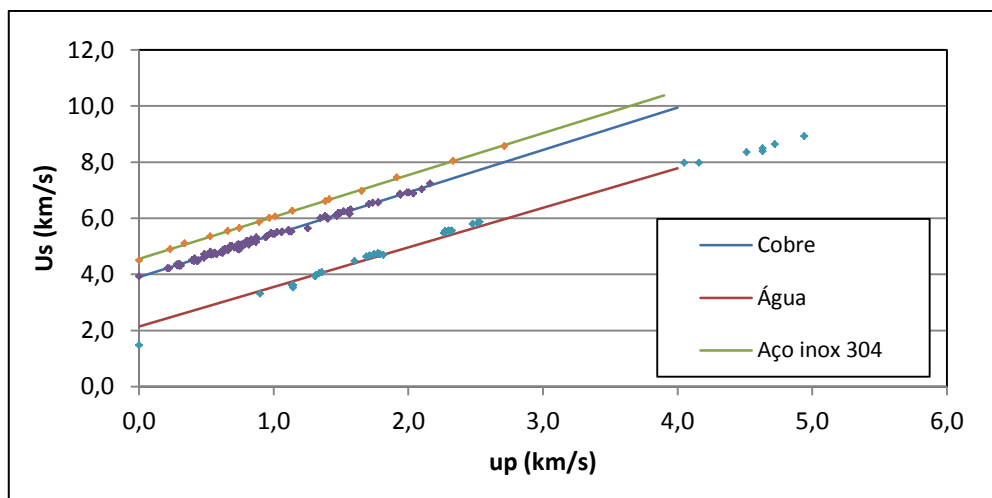
$$U_s = C_0 + s \times u_p \quad (4)$$

onde C_0 e s são constantes do material que, experimentalmente, podem ser determinadas. C_0 é a velocidade do som em um meio não perturbado e s é uma constante adimensional que tipicamente ronda o valor 1,5 [Hayes, 1973].

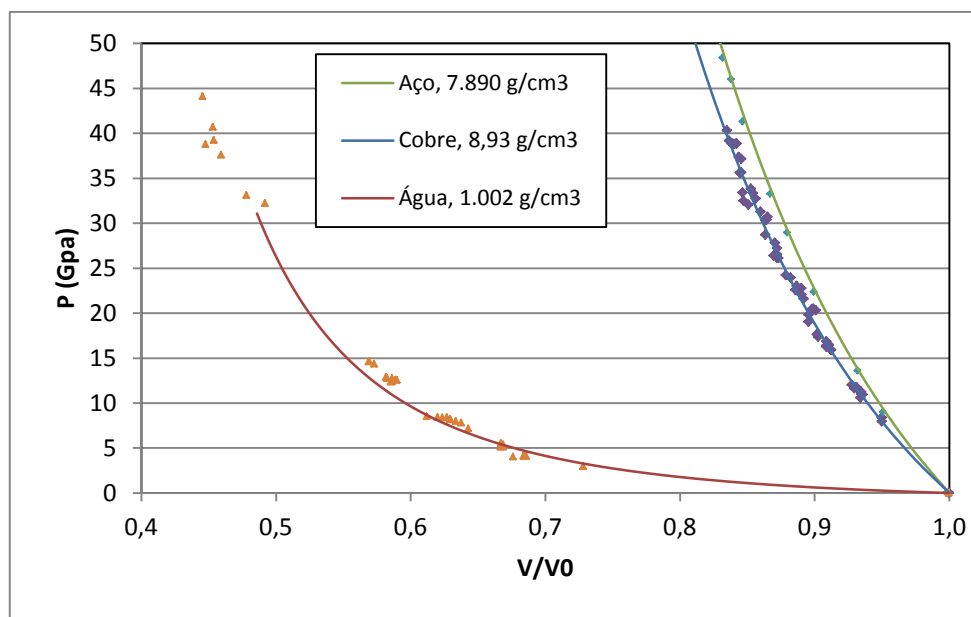
A Curva de Hugoniot define o estado de equilíbrio do material afectado pela onda de compressão, a partir de uma condição inicial. É de referir que a polar de choque não descreve os pontos de estado através dos quais o material passa durante o choque de compressão, pelo contrário, ela define apenas o estado final possível.

Apesar de ser a mais utilizada a curva U_s - u_p , é possível prever o estado do material com recurso à relação entre outras duas variáveis. Três dessas relações (U_s , u_p), (P , v), e (P , u_p) estão ilustradas na figura 3, para o cobre e aço Inox 316L, em estado sólido, e para a água em estado líquido. A partir dos valores experimentais de U_s e u_p [Marsh,

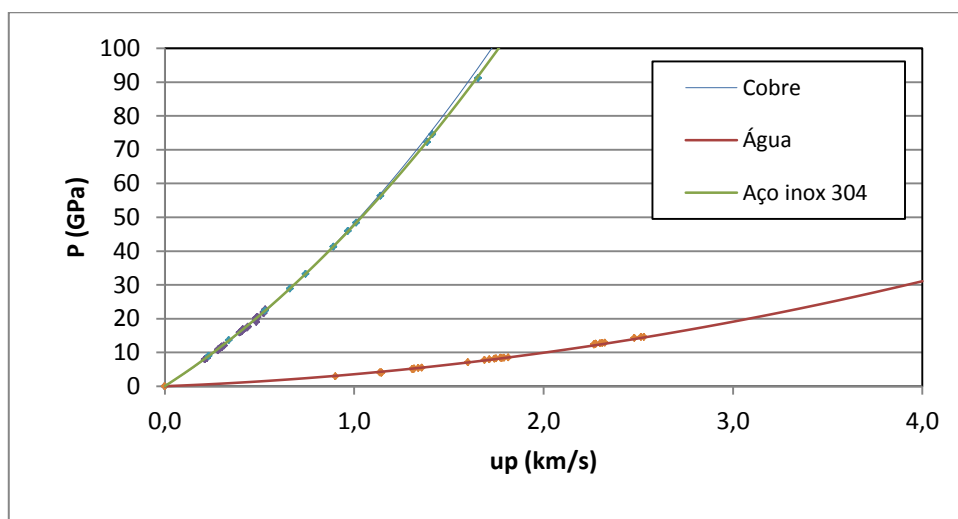
1980], determina-se o diagrama U_s-u_p . Os valores de C_0 e s são o valor da ordenada na origem e do declive, respectivamente, determinados através do ajuste dum função linear aos pontos do diagrama U_s-u_p . Os correspondentes valores de pressão e do volume específico são determinados com recurso à equação de conservação de movimento [cf. Equação (2)] e à equação de conservação de massa [cf. Equação (1)]. Em virtude dos pontos passarem sobre as curvas do modelo, reconhece-se que este modelo descreve com sucesso os pontos experimentais.



(a)



(b)



(c)

Figura 3. Curva de Hugoniot para o cobre e o aço 316L no estado sólido e para a água no estado líquido, em três planos, calculadas a partir de dados experimentais, Marsh, 1980.

2.2.4. O caso particular dos materiais porosos

No caso dos materiais porosos, o processo exaustivo que é a determinação experimental da Curva de Hugoniot, tem levado os investigadores a investirem sobre o problema tentando obter a Curva de Hugoniot para materiais porosos a partir da curva Hugoniot do sólido não poroso correspondente, aplicando para tal, os mesmos princípios utilizados na obtenção das Equações de Estado dos materiais não porosos.

2.2.4.1. Modelo de Thouvenin

Nos anos sessenta uma forma muito simples, de um modelo para a determinação da Curva de Hugoniot de sólidos porosos, foi proposta por Jacques Thouvenin [Thouvenin, 1965], e que é conhecido por *Plate Gap Model*.

Thouvenin, partiu do princípio de que um sólido poroso pode ser considerado como um conjunto de placas sólidas planas, com as mesmas dimensões, espessura igual a a e equidistantes, separadas por uma distância b , de tal modo que a massa específica do conjunto assim apresentado seja igual à massa específica do sólido poroso a modelar. Trata-se, portanto, de um modelo unidimensional no qual a propagação da onda de choque surge associada ao impacto sucessivo de placas e de onde resulta o aparecimento de uma

sequência de ondas de choque de expansão conforme se pode visualizar através da análise da representação esquemática do modelo que é apresentada na figura 4.

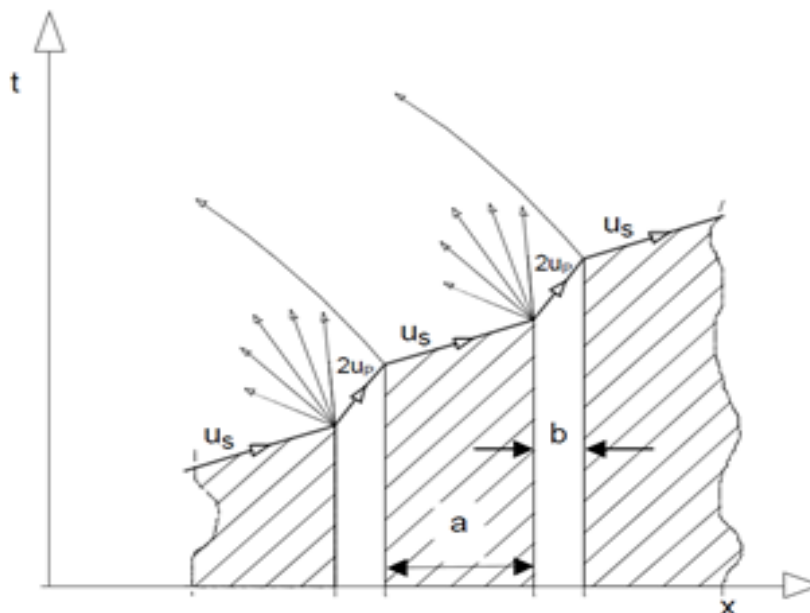


Figura 4. Representação esquemática do Modelo *Plate Gap* [Thouvenin, 1965].

De acordo com o representado esquematicamente na figura 4, quando a onda de choque se propaga na primeira placa, com uma velocidade U_s , atinge a sua superfície livre, esta é acelerada na direcção da segunda placa adquirindo uma velocidade aproximadamente igual a $2 \times u_p$. Simultaneamente, na superfície livre da primeira placa forma-se um leque de ondas de expansão, que se propagam em sentido contrário ao do próprio movimento da placa, e que reduz o valor da pressão a zero. O impacto da primeira na segunda placa induz, nesta última, uma onda de choque com uma velocidade U_s e, na primeira, uma onda de choque, de igual intensidade, que se propaga em sentido contrário ao movimento das próprias placas, com velocidade de magnitude igual a $U_s - 2 \times u_p$. O processo repete-se, de placa para placa, dando origem a uma série periódica de ondas de choque nas placas e projecção de matéria para o espaço entre elas.

De acordo com Thouvenin, a sucessão de impactos propaga-se com uma velocidade, designada por velocidade particular da fase U_{sp} , que é facilmente mensurável experimentalmente, mas que não tem o mesmo significado da velocidade de propagação de uma onda de choque, não podendo por isso ser introduzida sem as devidas precauções nas equações de conservação de Rankine-Hugoniot.

Se se definir um parâmetro λ como sendo o inverso da porosidade, tem-se que, de acordo com a figura 4,

$$\lambda = \frac{1}{\alpha} = \frac{\text{Massa específica do sólido poroso}}{\text{Massa específica do sólido não poroso}} = \frac{a}{a+b} \quad (5)$$

pelo que, de modo idêntico foi desenvolvido por Carton, 1997, a relação entre os tempos de propagação da onda de choque nas placas e da superfície livre no espaço entre elas, permite escrever:

$$\frac{1}{U_{sp}} = \frac{\lambda}{U_{ss}} + \frac{1-\lambda}{2 \times u_{ps}} \quad (6)$$

$$\frac{1}{u_{pp}} = \frac{\lambda}{U_{ss}} + \frac{1-\lambda}{2 \times u_{ps}} \quad (7)$$

Utilizando estas duas equações é possível calcular a velocidade de propagação da onda de choque e a correspondente velocidade particular com que fica animado o meio poroso após a sua passagem. A título de exemplo, é representado graficamente, na figura 5 os valores de U_{sp} e u_{pp} assim calculados, para o caso particular do cobre poroso com uma massa específica inicial de $3,007 \text{ g/cm}^3$, que corresponde a uma densidade inicial de cerca de 30% (DMT) sendo ainda possível comparar esses resultados experimentais para a mesma condição.

O recurso às equações de conservação, de acordo com o que advogam Hofmann e colaboradores [Hofmann, 1968], permite, conhecidos os valores de U_{sp} e u_{pp} , obter a relação entre P e u_p , que, a título de exemplo, para o mesmo caso particular do cobre poroso, é apresentada na figura 6.

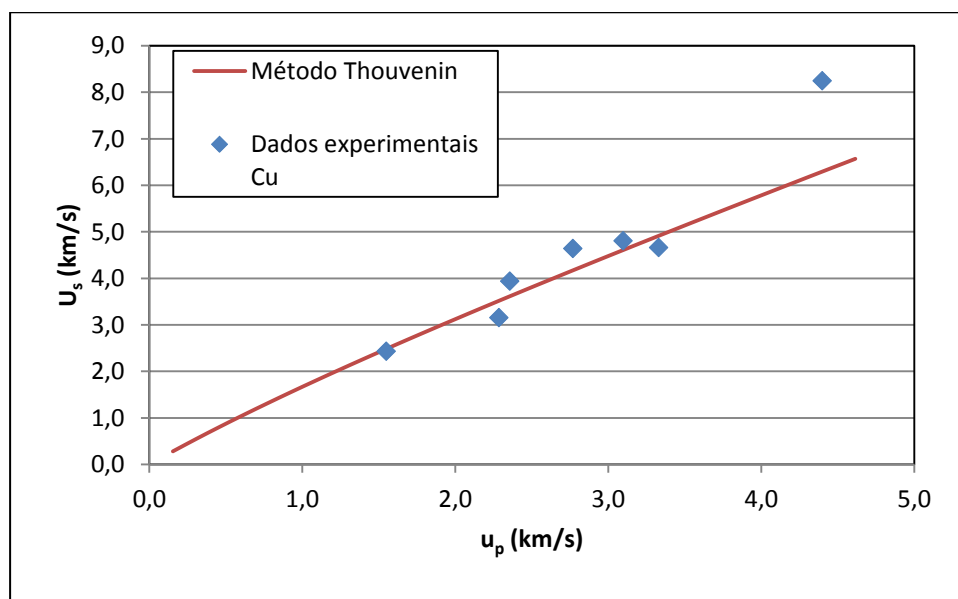


Figura 5. - Aplicação do modelo de Thouvenin no cálculo da velocidade de propagação da onda de choque e da velocidade particular, para o caso particular do cobre poroso com massa específica inicial de $3,007 \text{ g/cm}^3$. Resultados experimentais de Marsh, 1980.

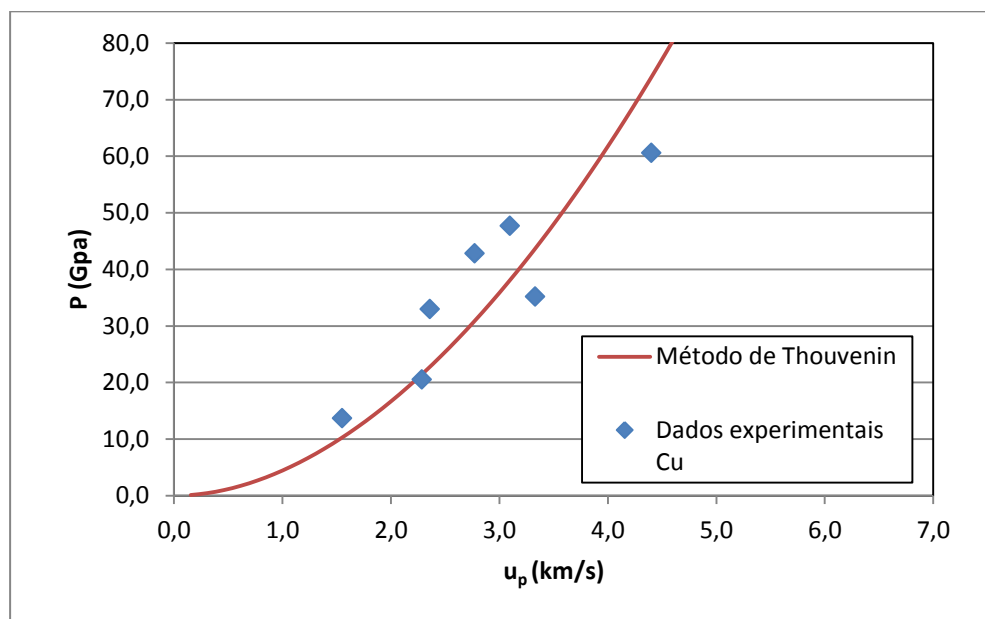


Figura 6. Aplicação do modelo de Thouvenin, no cálculo da Curva de Hugoniot, $P-u_p$, para o caso particular do cobre poroso com uma massa específica inicial de $3,007 \text{ g/cm}^3$. Resultados experimentais Marsh, 1980.

As figuras anteriores mostram que este simples modelo revela resultados que descrevem claramente os resultados experimentais. É visível a grande influência da densidade inicial na Curva de Hugoniot do sólido poroso.

2.2.5. Interação entre ondas de choque

Diferentes materiais têm diferentes impedâncias de choque, usualmente denominadas por Z , que influenciam em muito a transmissão da onda de detonação de material para material. A impedância de choque é definida como o produto entre a densidade inicial do material e a velocidade da onda de choque que percorre o material [Hayes, 1973].

$$Z = \rho_0 \times U_s \quad (8)$$

O método de adaptação de impedância desempenha um importante papel na solução gráfica de problemas de interação de ondas de choque. A impedância de choque é o declive da recta que passa no estado inicial e final no plano pressão – velocidade particular (P- u_p).

2.2.5.1. O método de adaptação de impedâncias

Dada a importância que o método de adaptação de impedância assume no tratamento dos resultados experimentais justifica-se que aqui seja feita uma análise detalhada dos princípios em que se baseia e dos pressupostos e simplificações que admite.

A reflexão e refração das ondas de choque ocorrem devido a desajustes na impedância de materiais diferentes.

O princípio subjacente à aplicação do método de adaptação de impedância é o da continuidade, ou seja, na interface de dois materiais justapostos a pressão e a velocidade particular são idênticas. Deste modo, uma onda de choque a propagar-se num material A , com um valor de pressão P_A e velocidade particular u_{pA} , ao atingir a interface do material A com o material B irá induzir neste último uma onda de choque de amplitude P_B e de velocidade partícula u_{pB} . O passo mais importante do método consiste em considerar que esse novo estado do material A se encontra sobre uma curva simétrica à de Hugoniot, reflectida em torno da recta $u_p = u_{pA}$.

Exemplo 1: Passagem de uma OC de material A para um material B com $Z_b > Z_a$.

A solução no plano P - u_p , antes e depois da interação das ondas de choque, é apresentada na figura 7. Neste caso, em que a impedância do material B é superior à do material A , a pressão P_B da onda de choque será superior à que se fazia sentir em A antes

da onda atingir a interface com *B*. Formar-se-á então em *A* uma onda de choque que se propaga em sentido inverso ao da velocidade particular, e que elevará a pressão deste de P_A para P_B , reduzindo a velocidade particular de u_{pA} para u_{pB} .

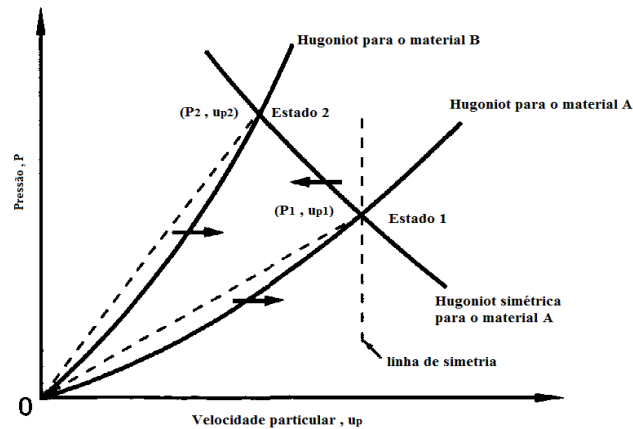


Figura 7. Transmissão de uma onda de choque em um meio de impedância de choque superior

Exemplo 2: Passagem de uma OC de material B para um material A com $Z_b > Z_a$.

A solução no plano $P-u_p$, antes e depois da interação das ondas de choque, é apresentada na figura 8. Ao caso contrário do exemplo anterior, quando a impedância de choque do material *B* é inferior à do material *A*, então P_B será inferior a P_A e isso terá como consequência a indução em *A* de uma onda de expansão, a propagar-se em sentido inverso ao da velocidade particular e que diminuirá o valor da pressão em *A* de P_A para P_B , aumentando o valor da velocidade particular de u_{pA} para u_{pB} .

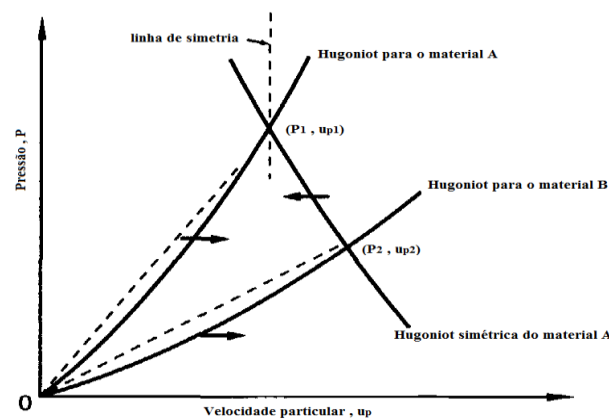


Figura 8. Transmissão de uma onda de choque em um meio de impedância de choque inferior.

2.3. Compactação dinâmica de pós

A compactação dinâmica é efectuada, através do pó, pela passagem de um choque intenso de compactação. A onda de choque pode ser gerada pela detonação de um explosivo em torno do pó, ou pelo impacto de um projectil a alta velocidade.

Um pó pode ser considerado como um material compósito, uma vez que é uma mistura de um sólido e um gás. A fase sólida é composta por muitas partículas individuais, geralmente com formas diferentes e uma distribuição de tamanhos, embutidas em uma fase gasosa contínua. A densidade de um pó pode ser variada em uma ampla gama, tipicamente entre 30 a 80% da densidade máxima teórica (DMT) do sólido. Carton (1997) deu a conhecer que a velocidade do som em um pó é muito baixa, em comparação à fase sólida, o que significa que a impedância de choque de um pó será muito baixa e a introdução de uma pressão elevada, da onda de choque no interior do pó, é muito difícil.

2.3.1. Compactação por ondas de choque originadas por detonação de um explosivo

Segundo Prummer (1973), a pressão causada pela progressão da onda de choque, causada por detonação de um explosivo, é a suficiente para que haja compactação de pós.

A densificação de pós por detonação é então uma alternativa às técnicas de compactação tradicionais de materiais. Uma das vantagens desta técnica, segundo Lennon (1979) é a produção de compactos de alta densidade em micro segundos a partir de pós sem qualquer tipo de aditivos ou ligantes. A aplicação e o desenvolvimento deste processo deve-se, em parte, ao facto de existirem materiais que não podem ser processados através das técnicas correntes.

De acordo com a configuração utilizada estes processos podem ser classificados em planos, esféricos e cilíndricos. [Carton, 1997].

Segundo a literatura, as aplicações industriais deste processo estão limitadas graças ao aparecimento no compacto, de macro-defeitos, como fissuração ou aparecimento de furo central (Meyers et al., 1987, Hokamoto et al., 2000)

2.3.1.1. Configuração cilíndrica

A configuração cilíndrica é de geometria simples e de fácil montagem. A constituição da montagem experimental centra-se num tubo metálico, que contém o pó, fechado nos dois extremos, cercado coaxialmente pelo explosivo. O detonador é acoplado na extremidade superior, sendo então, aí que se inicia a detonação. A onda de detonação propaga-se axialmente originando uma pressão elevada que faz implodir o tubo, acelerando e compactando o pó presente no interior do tubo. A Figura 9 representa esquematicamente o processo de detonação no processo de compactação com montagem cilíndrica.

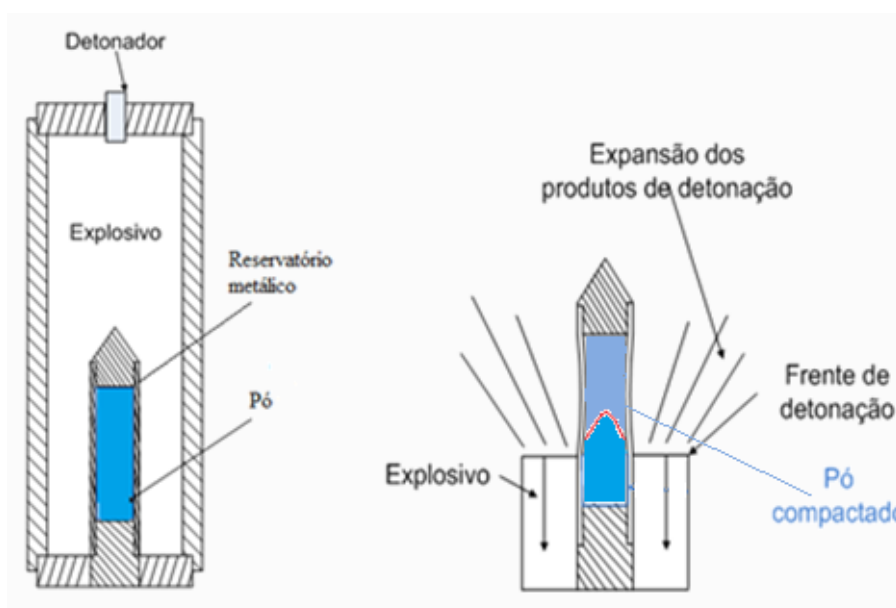


Figura 9. Representação esquemática do processo de compactação utilizando uma configuração cilíndrica (a frente da OC está representada por uma linha vermelha) (Prummer, 1973).

Este método experimental garante uma consolidação, através das ondas de choque, em grande parte devido à colocação da carga explosiva directamente em contacto com o contentor metálico do pó (Meyers et al., 1987).

A ocorrência de defeitos macroscópicos nos compactos é um problema grave que impede a aplicação industrial desta técnica. Causas, como a convergência da onda de choque inicial, enchimento defeituoso do tubo antes da compactação, confluência das ondas de choque no centro do tubo, são as causas responsáveis pelo aparecimento de falhas.

Algumas fissuras macroscópicas que, normalmente, ocorrem neste tipo de configuração podem ser visualizadas na figura 10.

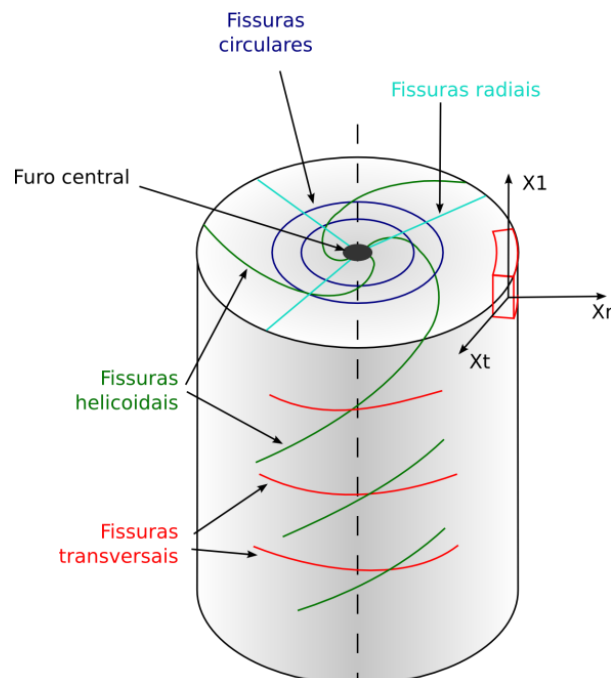


Figura 10. Diferentes tipos de defeitos que podem ocorrer na compactação por explosivos utilizando a configuração cilíndrica (Meyers e Wang, 1987).

2.3.1.2. Configuração plana com convergente em água

A compactação por explosivos a partir de uma configuração plana é um modo alternativo para a densificação de pós, também conhecido por método de explosivo de compactação uniaxial, e foi utilizado em vários trabalhos por vários autores.

Chiba et al., (1992) utilizou para o processamento de pós de ligas de titânio, um processo de configuração plana com reservatório de água recto a jusante da carga explosiva. Este investigador relatou bons resultados na densificação dos pós.

Hokamoto et al., (1999) desenvolveram uma montagem experimental plana, para estudar a consolidação de pós de diamante, que se distinguiu, por conter um reservatório de água de forma cilíndrica de secção convergente, que ligava os reservatórios dos explosivos e o do pó. O autor afirmou que obteve pressões mais elevadas e durante mais tempo.

Em 2002, o mesmo autor, realizou um estudo com o objectivo de medir a velocidade de propagação da onda de choque num material de referência. Utilizou o

processo de compactação por detonação com configuração plana e coluna de água. As diferentes medidas de velocidade, realizadas por Hokamoto et al., (2002), usando a água como o material de referência, foram obtidas em função da altura de água. Neste estudo foi realizado um grande número de ensaios.

O método tem a vantagem de possibilitar o controlo da pressão aplicada que é efectuada alterando a espessura da coluna de água, mas apenas permite produzir peças com pequenas espessuras uma vez que ao longo do pó ocorre um decaimento da pressão.

2.4. Material em estudo

O material em estudo, no presente trabalho, é um aço inoxidável austenítico do tipo 316 L.

2.4.1. Aço inoxidável

Em 1913, Harry Brealy, um metalúrgico inglês, trabalhando em um projecto para melhorar a resistência ao desgaste, que ocorria no interior dos canos das armas de fogo, descobriu acidentalmente que a adição de crómio ao aço com baixo carbono lhe conferia resistência. Além do ferro, carbono e crómio, os aços inoxidáveis modernos também podem conter outros elementos, como níquel, molibdénio e titânio. O níquel, o crómio e o molibdénio aumentam a resistência à corrosão do aço inoxidável. É a adição de um mínimo de 12% de crómio que faz com que seja resistente à ferrugem.

2.4.2. Aço austenítico tipo 316L

Os aços austenítico têm como fase primária a austenite (cúbica de faces centradas). Estes são ligas que contêm crómio e níquel. São considerados como sendo os mais resistentes à corrosão em meios com ambiente de atmosfera industrial ou meios ácidos, mantendo a superfície brilhante e praticamente isenta de produtos de corrosão generalizada.

2.5. Preparação dos corpos-de-prova

Os métodos de preparação de superfícies para investigações macroscópicas e microscópicas de materiais são numerosos e variados. No caso particular da observação por microscopia óptica, é necessário uma superfície que possua contrastes para definir microestruturas.

A análise metalográfica, que pode ser macrográfica ou micrográfica, permite que se analise corpos-de-prova sob o ponto de vista de sua estrutura, procurando relacioná-la às características físicas, composição e processo de fabrico, de modo a esclarecer o seu comportamento numa determinada aplicação.

Pela macrografia adquirem-se informações de carácter geral, um aspecto sobre a homogeneidade do material da peça, a distribuição, natureza e quantidade de certas impurezas e processo de fabrico. Pela micrografia pode-se observar a granulometria do material, a natureza, quantidade, distribuição e forma dos vários constituintes, certas inclusões, que no seu conjunto levam a uma série de resultados interessantes e de utilidade prática.

2.5.1. Polimento dos materiais após explosão

O primeiro desbaste dos compactos é realizado numa polidora mecânica, segue uma sequência de inúmeras lixas de Carboneto de silício (SiC), de diferentes granulometrias: 800, 1200, 2400. Faz-se uma visualização prévia do material na lupa e em seguida no microscópio óptico, tendo o cuidado de lavar a amostra com água, passar um algodão humedecido com álcool sobre a superfície molhada para rápida evaporação da água, e por último aplicar ar quente através de um secador, para evitar a oxidação da amostra. Visualiza-se no microscópio óptico se todas as linhas estão orientadas em apenas uma direcção, gira-se a amostra em um ângulo de 90° e o procedimento de desbaste é iniciado novamente, com uma lixa de granulometria menor.

Após o desbaste inicial, o material compactado deve ser polido com uma suspensão de sílica a fim de se obter melhor acabamento superficial. Este processo de polimento deve ser realizado com um pano *MD/DP*. Terminado todo este processo, de extrema importância para dar sequência aos demais resultados, pode ser dada sequência às outras técnicas seguintes.

2.5.2. Difracção de Raios X

A técnica de difracção de Raios X é muito importante na análise da estrutura cristalina do material [Brundle, 1992]. Este método fornece informações sobre a natureza e os parâmetros da rede cristalina, assim como o tamanho, a perfeição e a orientação dos cristais. A técnica permite identificar as fases presentes no material.

2.5.3. Dureza

A dureza de um sólido é medida em termos da resistência do sólido à deformação plástica resultante da acção de um indentedor com geometria definida, normalmente com uma forma esférica, cónica ou piramidal. É uma técnica muito difundida em metalurgia para a caracterização individual de componentes estruturais de ligas, camadas superficiais e pequenas amostras.

3. METODOLOGIA EXPERIMENTAL

Neste capítulo, são apresentados os métodos empregados no desenvolvimento experimental para a obtenção dos sólidos, bem como a descrição de toda a composição, condições de compactação, além das suas técnicas correspondentes.

A técnica experimental de medição, utilizada com o objectivo de caracterizar a velocidade e a forma da onda de choque, é descrita nesta secção, limitada ao mínimo e indispensável para a sua compreensão.

Para uma fácil interpretação da metodologia experimental utilizada neste estudo, encontra-se representado na figura 10, um fluxograma de todo o procedimento experimental.

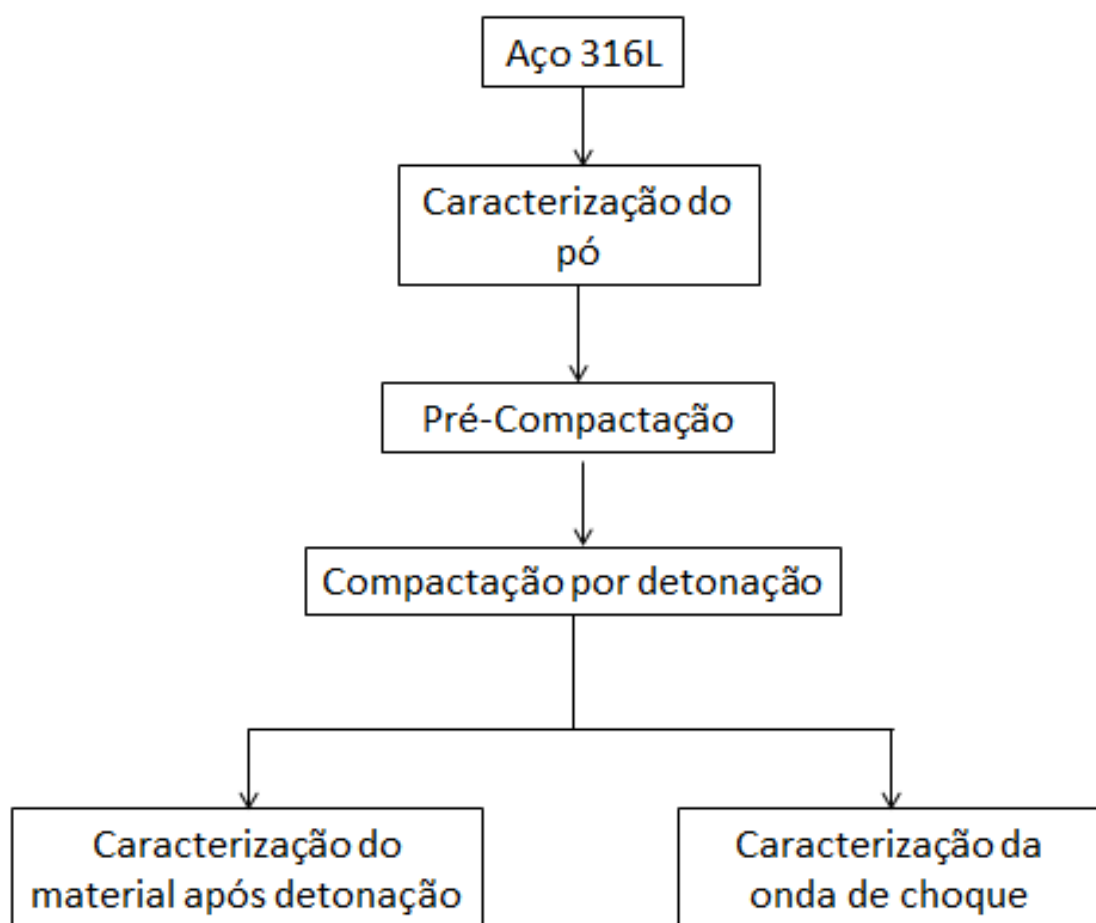


Figura 11. Fluxograma do procedimento experimental.

3.1. Materiais

Com o intuito de avaliar os efeitos físicos do pó nas propriedades das amostras, foi escolhido o pó de aço inoxidável comercial 316L, atomizado a água, fornecido por *Epson Atmix Corporation* do Japão, cujo tamanho de partícula é micrométrico e de densidade igual a $7,69 \text{ g/cm}^3$. A composição química deste pó é facultada pelo distribuidor e está apresentada na tabela 1.

Tabela 1. Composição química do aço inoxidável 316L

Fe	Cr	Ni	Mo	Si	Mn	C	N	P	S
70,3	16,5	10,5	2,1	0,35	0,15	0,027	0,02	0,013	0,004

3.2. Caracterização do pó

Na caracterização deste pó foram feitos ensaios de escoabilidade, densidade teórica e batida, distribuição granulométrica e de morfologia. A avaliação destas características realizou-se utilizando as técnicas sumariadas na tabela seguinte.

Tabela 2. Técnicas utilizadas na caracterização do pó.

Característica	Técnica
Escoabilidade	Flodex by Hanson
Densidade Aparente e Batida	ISO 3953
Massa volúmica	Picnometria de Hélio
Análise granulométrica	Espectrometria de Difracção Laser (Fraunhofer)
Composição fásica	Difracção de Raios X [DRX]

Em particular para o caso da determinação da escoabilidade, foram adoptados alguns procedimentos que são necessários serem discutidos para a interpretação posterior dos resultados. O equipamento utilizado nesta avaliação, foi desenvolvido pela *Hanson Corporation* e consiste em um copo cilíndrico com um furo circular variável no fundo por onde uma massa de pó é deixada cair livremente. O diâmetro do buraco que permite a queda do pó é designado por diâmetro crítico.

3.3. Processo de Compactação

3.3.1. Pré-compactação

O pó foi compactado em matrizes metálicas cilíndricas de aço (reservatório do pó). A compactação foi feita por prensagem uniaxial a frio. No processo com configuração plana, as medidas de carga aplicadas à massa de pó em função do seu deslocamento dentro do reservatório foram realizadas numa prensa hidráulica já no processo cilíndrico a prensagem foi feita manualmente para não danificar as sondas de fibras ópticas que se encontravam no interior do tubo metálico. A carga de compactação máxima aplicada foi de 10 toneladas.

Após a pré-compactação procedeu-se à eliminação do gás intersticial em vácuo durante 12 horas com o objectivo de minimizar a quantidade de gás presente entre as partículas de pó. Segundo Carton (1997), esta quantidade de gás poderá condicionar o processo de densificação.

3.3.2. Compactação dinâmica

Na presente investigação foram utilizados processos com configuração plana e cilíndrica, para a compactação do pó de aço inox. A representação da montagem experimental destas duas técnicas pode ser visualizada na figura 12.

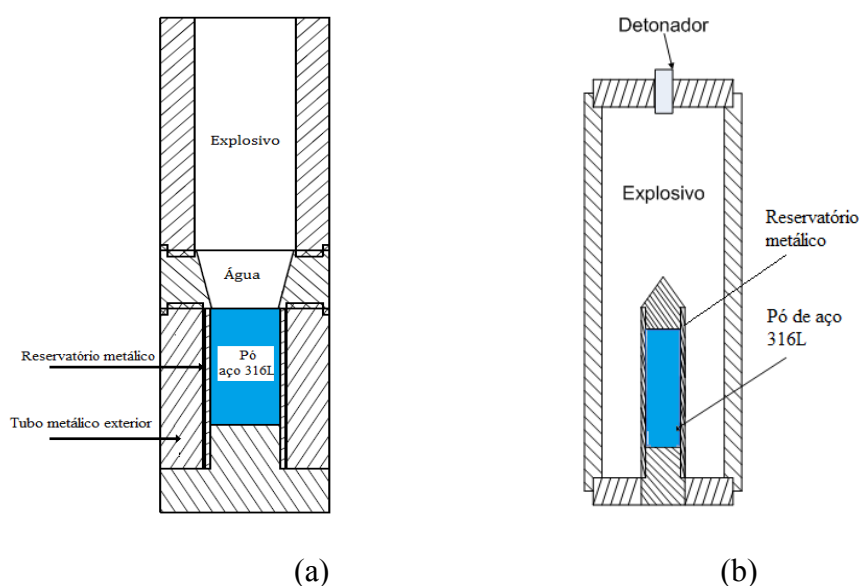


Figura 12. Representação esquemática da montagem experimental usadas nos ensaios de compactação dinâmica, ((a)-Montagem Plana, (b)-Montagem Cilíndrica)).

O plano de ensaios realizado ao longo deste estudo, encontra-se esquematizado nas tabelas 3 e 4, onde são discriminados todos os parâmetros que mais influenciam os dois processos de compactação. Em anexo (Anexo C) encontram-se os desenhos de projecto elaborados, e as medidas das montagens.

Tabela 3. Plano experimental de ensaios (MP – Montagem Plana).

Nº do ensaio	Ref.	Altura da coluna de explosivo [mm]	Diâmetro da coluna de explosivo [mm]	Densidade inicial do explosivo [g/cm ³]	Altura da coluna de água [mm]	Diâmetro do reservatório do pó de aço [mm]	Densidade verde do aço [% DTM]
1	MP1	80	30	1,06	20	21	66
2	MP2	80	30	1,08	20	21	68
3	MP3	120	30	1,06	10	13	71

Neste estudo fez-se variar a altura da coluna de água, no processo de configuração plana, com objectivo de registar a atenuação da velocidade da onda neste meio de propagação.

Tabela 4. Plano experimental de ensaios (MC- Montagem Cilíndrica).

Número do ensaio	Referência	Altura do tubo de explosivo [mm]	Diâmetro do tubo de explosivo [mm]	Densidade inicial do explosivo [g/cm ³]	Diâmetro do reservatório do pó de aço [mm]	Densidade verde do aço [% DTM]
4	MC1	180	40	0.92	13	61
5	MC2	180	40	0.89	13	59

É de salientar que existe um erro associado à densidade verde inicial dos compactos no processo de configuração cilíndrica. Com objectivo de não danificar a sonda de fibras ópticas presentes no interior do reservatório de pó, o processo de pré-compactação foi realizado manualmente por adição gradual de pequenas quantidades de pó metálico, o que origina uma distribuição da densidade verde no interior do tubo variável.

3.3.3. Gerador de Ondas de Choque

Como um dos objectivos a que a realização deste tipo de ensaios está associada é o da análise da propagação da onda de choque nas amostras, um dos requisitos a exigir ao

gerador de ondas é, portanto, o da exibição de uma planaridade dentro de valores consideravelmente aceitáveis. Uma das hipóteses usualmente considerada para responder aos requisitos do processo, passa pelo recurso de emulsão explosiva com base de nitrato de amónio cuja velocidade de detonação em função da densidade inicial já foi estudada por Mendes et al., (2010).

O gerador da onda de choque de compactação é uma mistura de nitrato de amónio e nitrato de sódio em solução aquosa emulsionada com uma mistura de hidrocarbonetos (óleos e ceras sensibilizada com diferentes quantidades de micro esferas ocas de vidro (MEOV).

A escolha deste explosivo permitiu, por variação da quantidade de MEOV, regular o valor da velocidade de detonação e da pressão. As densidades de explosivo para uma percentagem de 5 e 10 % de MEOV são respectivamente de 1,06 e 0,86 g.cm⁻³.

3.3.4. Medição da velocidade de propagação da onda de choque

Como foi patente anteriormente, um dos objectivos propostos para este trabalho experimental envolve a determinação da velocidade de propagação da onda de choque quer no pó metálico e no explosivo, quer na água.

Uma solução pouco comum faz o uso de microesferas ocas de vidro cheias de gás raro – Árgon ou Xénon – que são colocadas no topo de fibras ópticas. Quando a onda de choque passa pelas microesferas comprime o gás existente no seu interior produzindo um pico de luz que serve de referência ao momento da sua passagem.

Utilizando este princípio, foi desenvolvido no LEDAP uma sonda óptica de contacto, multicanal, que permite conhecer em cada ensaio, com uma resolução espacial superior aos 250 µm, o momento de passagem da onda de choque. O elemento central desta sonda é uma fita de fibras ópticas, com um certo número de fibras independentes cujo diâmetro individual é de 250 µm e das quais se pode observar uma fotografia na Figura 13. Esta sonda trabalha acoplada a uma câmara electrónica de varrimento – THOMSON TSN 506 N- que permite a fotocronografização do fenómeno com uma resolução temporal superior ao nanossegundo.

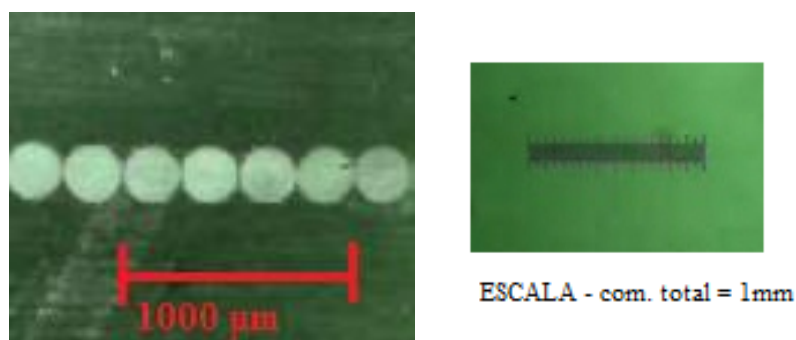


Figura 13. Vista frontal de um conjunto de fibras numa matriz de resina, ao microscópio óptico.

Na configuração cilíndrica, a fita de fibras ópticas é introduzida nos reservatórios da amostra de pó e do explosivo perpendicular à direcção de propagação da onda. As fibras são preparadas de maneira a que aquisição de luz se faz através de várias janelas rectas, distantes umas das outras, abertas ao longo da largura da sonda. Este tipo de configuração das fibras tem como objectivo a determinação da forma e velocidade da onda de choque durante a sua propagação.

Na configuração plana para avaliação da velocidade de propagação da onda de choque, a fita de fibras é posicionada paralelamente à direcção de propagação da onda, sendo a parte activa da sonda, a parte da fita de fibras que fica no interior do reservatório de água e de explosivo.

A compressão conjunta do material, das MEOV e das fibras ópticas, como resultado da passagem da onda de choque, dá origem a luz que é conduzida através das fibras até à câmara electrónica de varrimento onde se faz o registo do sinal em película fotográfica. Na figura 14 é possível visualizar uma representação esquemática da posição da sonda óptica no interior do pó metálico e no interior da emulsão explosiva durante ensaio cilíndrico e, logo ao lado, a posição da sonda no reservatório de explosivo e da água no processo de compactação com montagem plana.

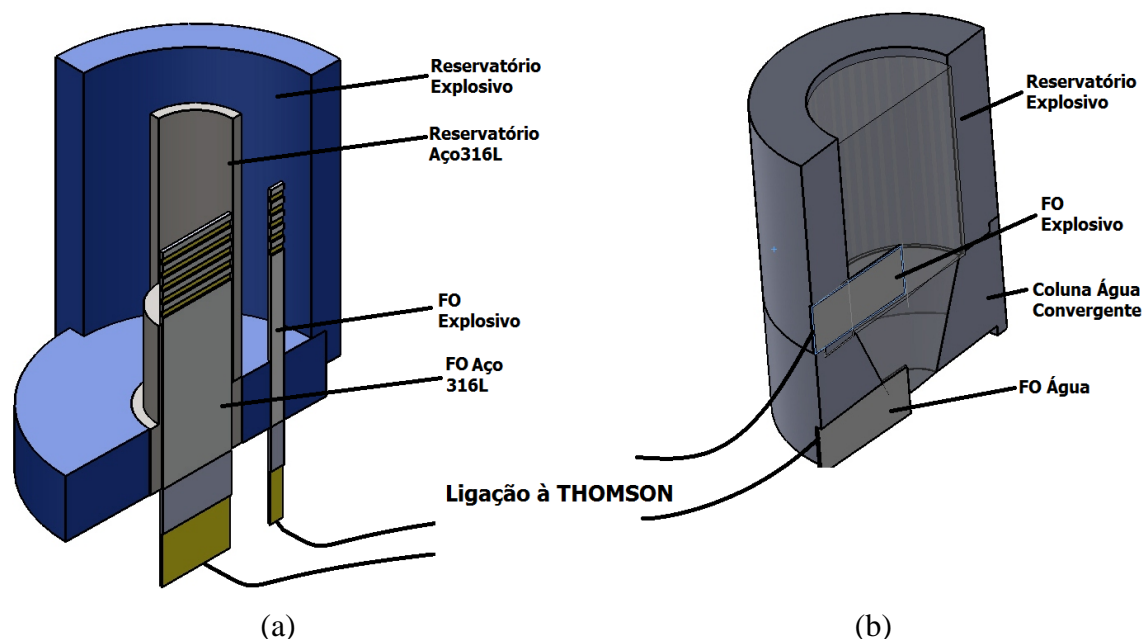


Figura 14. Representação esquemática da posição das Fibras Ópticas (FO), ((a)– Configuração Cilíndrica com pormenor das janelas nas sondas, (b)– Configuração Plana).

3.4. Estudo dos Compactos

3.4.1. Análise por Microscopia Óptica

Após o corte e o polimento, a microscopia óptica dos compactos foi realizada num microscópio com sistema de aquisição de fotografia e ampliação de imagem.

3.4.2. Análise por difracção de Raios X

Foi utilizado um micro-difratómetro X’Pert, Philips, operado com anticátodo de cobre, cuja linha $K\alpha$ possui um comprimento de onda de $1,5418 \text{ \AA}$. Os padrões de difracção foram obtidos para a condição de aquisição de tamanho de passo $0,026^\circ$ em uma área de varrimento de $250 \mu\text{m} \times 250 \mu\text{m}$. A identificação dos picos presentes realizou-se graças à consulta da base de dados do *International Center for Diffraction Data*.

3.4.3. Medidas de densidade

A densidade verde dos corpos-de-prova foi obtida através do método geométrico. Para tal foram realizadas medidas dimensionais e de massa em cada ensaio.

A densidade do material compactado foi medida a partir de um método que se baseia na análise de micrografias das superfícies com auxílio de um *software* informático.

Este programa faz a avaliação da porosidade aberta. Foram realizadas cinco medidas em cada espécime para se calcular o valor da porosidade aberta.

3.4.4. Medidas de Ultramicrodureza

O teste de ultramicrodureza de Vickers dos compactos foi realizado utilizando o equipamento Fischercope H100 (Fischer Instruments). As condições de medida foram: carga 1 N e um tempo de manutenção de 30 segundos, do indentador sobre a amostra.

Este equipamento, disponível no CEMUC, permite avaliar as curvas de carga e descarga no fim de cada indentação através das quais é possível ter noção da influência da porosidade no ensaio, possibilitando assim a eliminação a partida dos resultados afectados.

3.5. Caracterização das Ondas de Choque

A análise dos fotocronogramas obtidos foi realizada com recurso a *software* de tratamento de imagem que permitiu a construção dos diagramas $x-t$ de propagação da onda de choque.

A avaliação da velocidade de propagação da OC, para efeitos da determinação das curvas Hugoniot características dos materiais analisados, fez-se de modo sistemático através do ajuste de uma função aos pontos $x-t$ obtidos a partir dos fotocronogramas de cada ensaio e calculando de seguida o valor da derivada dessa função. Uma vez conhecidos os valores da velocidade de propagação da OC em cada material, determina-se o valor de u_p recorrendo à equação de estado [cf. Equação (1)] e a valores de C_0 e s determinados a partir de dados experimentais relativos à água, aço inox e cobre, ambos em estado sólido, obtidos por Marsh, (1980), ou a partir da aplicação do método de Thouvenin no caso de os materiais serem porosos. Depois, o correspondente valor de P com a equação de conservação de movimento [cf. Equação (2)] e finalmente com recurso à equação de conservação de massa [cf. Equação (1)] o valor do volume específico. O resultado da aplicação desta metodologia será apresentado em gráficos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo serão apresentados os resultados obtidos do aço, desde a caracterização do pó de partida e a caracterização das microestruturas e propriedades mecânicas após explosão até à caracterização das ondas de choque correspondentes. Na secção 4.1, são apresentados os resultados e discussão da caracterização da matéria-prima. Na secção 4.2, os resultados obtidos com os materiais compactados são apresentados em duas subsecções relativas aos dois tipos de montagens distintas.

4.1. Caracterização do Pó de Aço 316L

4.1.1. Distribuição de tamanho de partículas e massa volúmica

Para a caracterização da distribuição de tamanho de partículas, como mencionado anteriormente, optou-se pela utilização da técnica de Difracção de Laser. A Figura 15 ilustra a distribuição obtida com recurso a esta técnica.

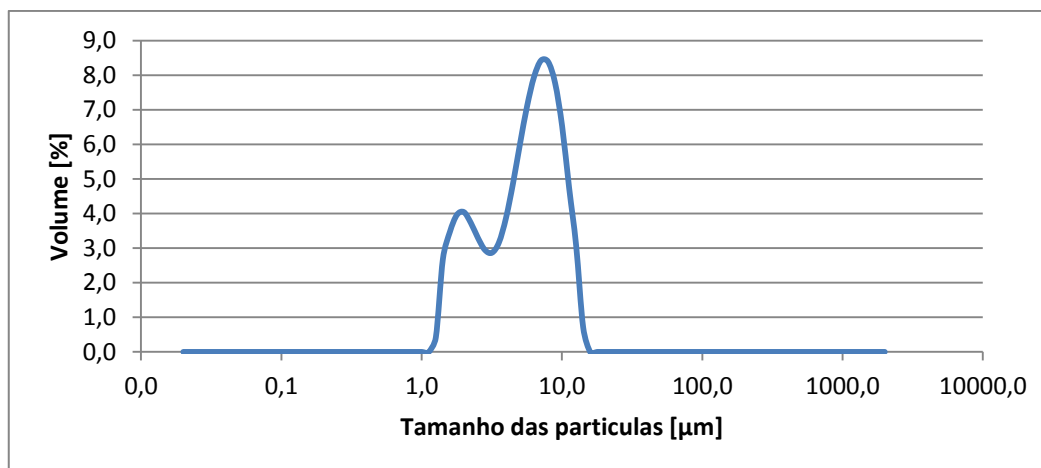


Figura 15. Diagrama relativo à distribuição do tamanho de partículas do pó de aço comercial Atmix SS.

Através da figura anterior podemos destacar a ocorrência de uma distribuição de tamanhos bimodal com um diâmetro médio igual a 5,4 µm.

O valor da densidade do pó de aço metálico determinada a partir do deslocamento do volume de hélio é $7,70 \text{ g/cm}^3$.

4.1.2. Escoabilidade, Densidade Aparente e Batida

Os testes de escoabilidade realizados ao pó são apresentados na tabela 5, onde é possível constatar que o diâmetro crítico à passagem do pó é igual a 26 mm.

Tabela 5. Tabela relativa aos testes de Escoabilidade do pó 316L, (D-diâmetro, P- passou, NP – não passou).

Ensaio	D orifício (mm)	P	NP	P	NP	P	NP
1	20		X		X		X
2	22		X	X			X
3	24	X			X		X
4	26	X		X		X	

Segundo os procedimentos padrões da norma ISO 3953, foram obtidos os seguintes resultados de densidade aparente ou solta e densidade batida mostrados na tabela 6. É de reparar que na determinação da densidade batida foram realizados testes com 10, 100, 250 e 500 batimentos

Tabela 6. Tabela relativa aos testes de densidade aparente e batida pó do 316L

ρ Aparente	ρ Bat. (10x)	ρ Bat. (100x)	ρ Bat. (250x)	ρ Bat. (500x)
34%	40%	44%	45%	45%
DMT	DTM	DTM	DTM	DTM

4.1.3. Difracção de Raios X (DRX)

O aço 316L é um aço austenítico, mas como se pode observar na figura 16 o pó metálico é bifásico, constituído por ferrite δ e austenite (γ). A fase ferrítica surge neste pó como maioritária devido ao processo de arrefecimento rápido que ocorre na produção do pó.

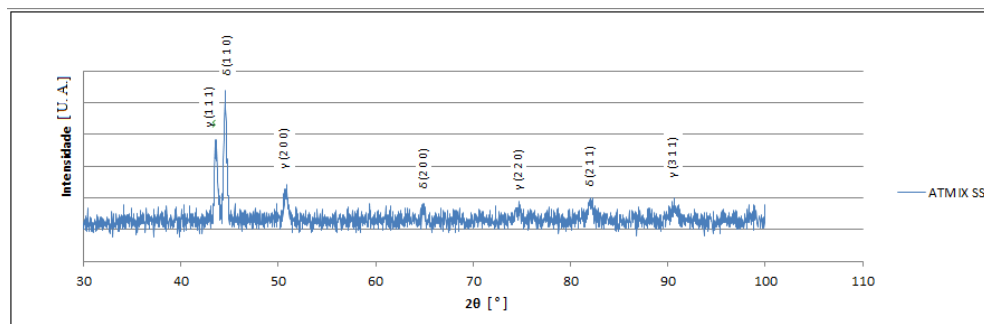


Figura 16. Diffractograma de raios X do aço Atmix SS do tipo 316L (γ – austenite, δ – ferrite δ).

4.2. Caracterização do material após explosão

4.2.1. Montagem Plana

4.2.1.1. Aspecto Geral

No presente estudo, como foi mencionado anteriormente, foram realizadas três ensaios de compactação dinâmica a partir do processo com configuração plana. Relativamente ao primeiro ensaio realizado, não se obteve qualquer tipo de compactos de aço, visto o pó metálico ter desaparecido na sua totalidade. Este facto deve-se à existência de ondas de reflexão associadas ao processo.

Com o objectivo de prevenir este problema, o pó de aço foi adicionado entre duas quantidades de pó cobre, durante a etapa de pré compactação, prevendo-se, assim, a permanência do aço durante o processo de compactação.

Na figura 17 são apresentadas fotografias, que evidenciam o aspecto geral dos resultados finais à lupa desta técnica. A figura 17 (a) diz respeito à secção transversal do compacto resultante do segundo ensaio. Na figura 17 (b) é possível constatar o aspecto geral da superfície do pó metálico consolidado perpendicular à direcção da onda, relativo ao terceiro ensaio com configuração plana, ainda envolvida pela matriz metálica cilíndrica (reservatório do pó).

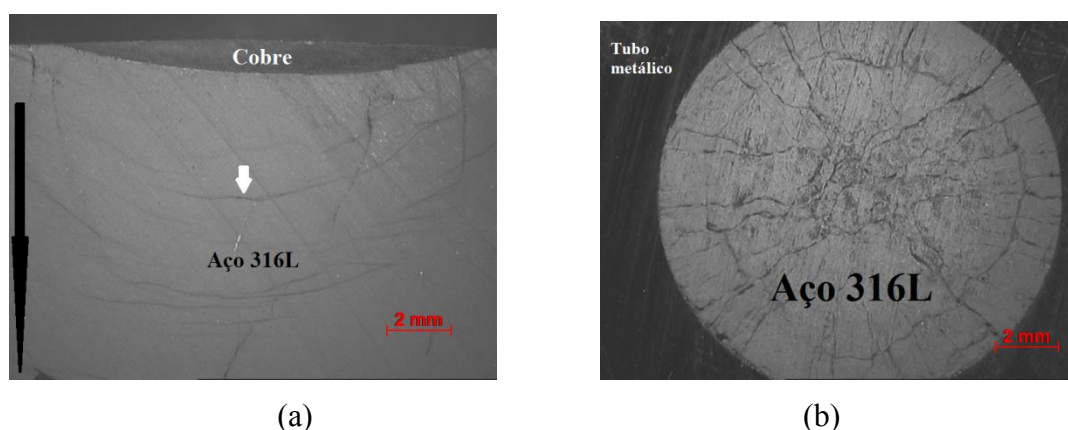


Figura 17. Fotografias exemplificativas dos compactos obtidos por explosão ((a)– Compacto relativo a MP2- seta preta a indicar a direcção da OC, (b)- Compacto relativo a MP3)

A figura 17 (a) comprova a existência de ondas de reflexão durante o processo de compressão. É possível observar os defeitos estruturais gerados por este fenómeno, assinalados com uma seta branca, ao longo do comprimento do compacto, ou seja, na direcção da propagação da onda de choque. As geometrias destes defeitos estruturais indicam-nos uma maior velocidade da OC na zona central do material e existência de atenuação da OC.

Como se pode visualizar, não ocorreu qualquer estado de sinterização nos resultados finais deste processo. Devido à falta de ligação interparticular os compactos quebraram-se durante o processo de corte do tubo que os envolvia. Constatou-se que os compactos são extremamente porosos e, este facto confirmou-se com absorção de água por parte do material, durante a etapa de polimento, impossibilitando um bom acabamento superficial.

O facto de existir folga entre o tubo que contém o pó e o reservatório do mesmo, idealizada para não existir qualquer tipo de atrito, é a causa para o regime de fissuração evidenciado na figura 17 (b).

4.2.1.2. Microscopia óptica

Na figura 18 são apresentadas micrografias (MG) das microestruturas dos materiais compactados dinamicamente.

As condições do processo de compactação, apesar de distintas, produziram uma microestrutura idêntica em ambos os ensaios. É possível visualizar uma

microestrutura bastante heterogênea e irregular, onde estão presente grande quantidade de poros.

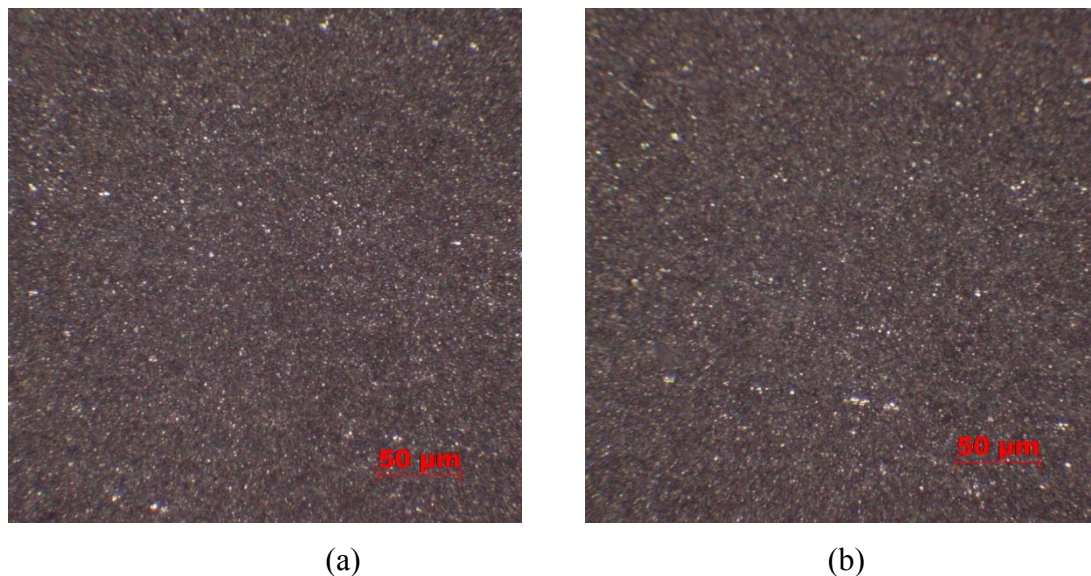


Figura 18. Micrografias do aço 316L compactado dinamicamente, com recurso à configuração plana ((a)– Compacto relativo a MP2, (b)- Compacto relativo a MP3).

4.2.1.3. Difraccção de Raios X (DRX)

Na figura 19 são apresentados os padrões de microdifracção de raios X dos compactos produzidos nos dois ensaios de compactação a partir da configuração plana. Como pode ser visto, a compactação do pó de aço 316L produzido por esta técnica mantém a estrutura bifásica do pó inicial.

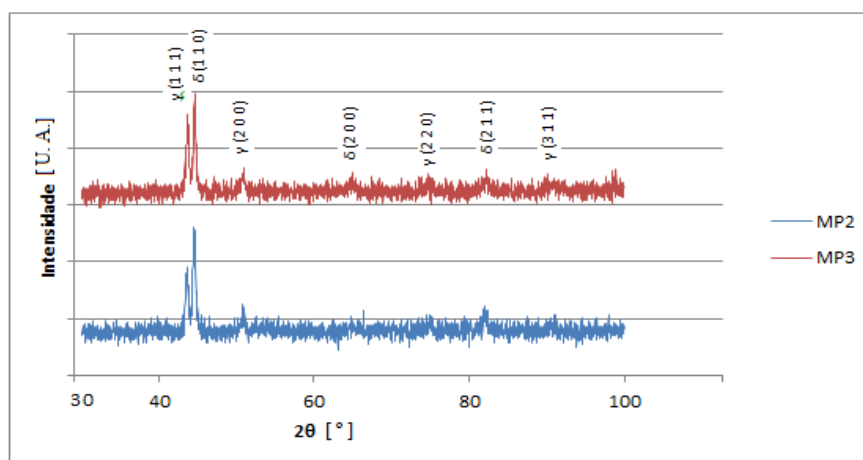


Figura 19. Difractogramas de raios X do aço 316L após detonação por explosão com recurso ao processo de configuração plana.

4.2.1.4. Densidade e Ultramicrodureza

Os métodos de análise de porosidade normalmente utilizados, não se mostraram capazes, quando aplicados ao tipo de compactos resultantes da detonação em montagem plana. Na análise a partir das micrografias com recurso a *software*, a dificuldade em constatar a presença de poros impossibilitou a utilização desta técnica. A porosidade excessiva destes compactos causou a absorção do verniz aplicado durante processo de avaliação de densidade aparente, a partir do Método de Arquimedes, impedindo uma avaliação acertada. Para além destas duas técnicas, foi utilizado outro processo de análise característico de materiais cerâmicos, denominada por *Boiling Test* (Anexo A), que se constatou não ser adequado para um material com estas propriedades.

A evolução da dureza, avaliada por Micro-indentação, das superfícies dos corpos-de-prova de aço 316L resultantes da compactação dinâmica com processo de configuração plana nos dois ensaios com sucesso, é mostrada na figura 20.

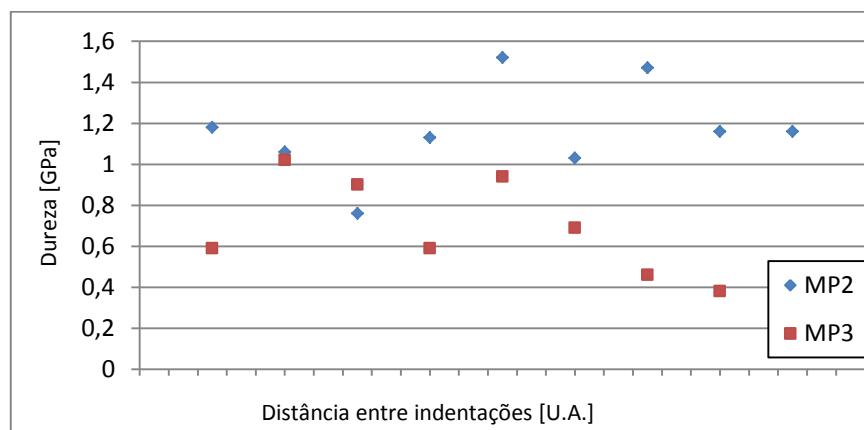


Figura 20. Diagrama da evolução dos valores de Dureza medidos em várias indentações.

A figura 20 evidencia os valores de dureza resultantes de indentações equidistantes e orientadas numa direcção sempre com o mesmo sentido. Em geral os valores são abaixo do expectável para o material sólido. A partir da análise dos valores medidos, constata-se que existe uma ligeira diferença dos valores de dureza relativos aos dois ensaios, que pode ser justificada com as condições de realização, serem distintas nas duas experiências em questão e que estes valores são extremamente afectados pela

porosidade. Para este tipo de processo não foi possível relacionar os valores de dureza dos compactos com as suas densidades a partir dos resultados dos ensaios realizados.

4.2.2. Montagem cilíndrica

4.2.2.1. Aspecto Geral

Na figura 21 é visível o aspecto típico do tubo reservatório de pó de aço após a consolidação em configuração cilíndrica. Durante o processo ocorre a contracção do tubo, que é tanto mais significativa quanto maior o grau de densificação.



Figura 21. Fotografia do tubo de ensaio após o processo de compactação (A – Corte 1, B – Corte 2, Seta – Sentido da velocidade de detonação).

Os corpos-de-prova resultantes dos dois ensaios, depois de cortados e polidos, são apresentados nas figuras 22 e 23 através de fotografias ampliadas com recurso à lupa. A figura 22 diz respeito ao ensaio de partida concretizado (MC1), e a figura 23 à réplica do primeiro ensaio (MC2). Os conjuntos de imagens, correspondentes às tentativas de compactação com referência MC1 e MC2, são dispostos em duas imagens correspondentes a exemplares consecutivos dos compactos.

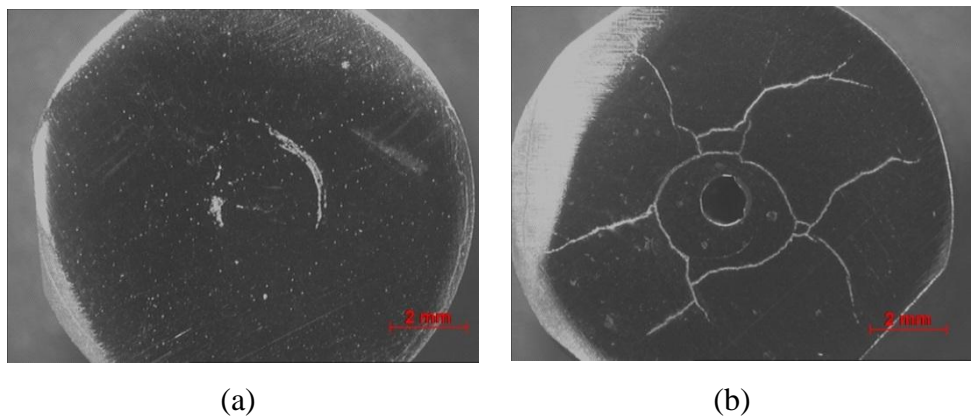


Figura 22. Fotografias exemplificativa dos compactos obtidos por explosão relativos a MC1 ((a)– Corte 1, superfície afastada da sonda (b)- Corte 2, superfície próxima da sonda).

É possível constatar a presença de macrodefeitos nos compactos de ambos os ensaios, entre elas, fissuras radiais e circulares e também um defeito típico deste processo que é o furo central devido a onda de Mach. O facto de o material da periferia se encontrar sujeito a uma tensão de compressão superior à do material do centro, gera uma força de tracção que pode originar fissuras radiais de acordo com Mamalis (2000). Quanto às fissuras do tipo circular, segundo Meyers et al., (1987) são produzidas pela força de tracção resultante da reflexão da onda de compressão que se expande radialmente.

O aparecimento do Furo de Mach deve-se à elevada quantidade de energia acumulada no centro do compacto que causa a fusão ou mesmo a vaporização do material (Carton, 1997). O material fundido escorre para a base do tubo e em vez de um compacto cilíndrico obteve-se um tubo de material compactado. A densidade inicial do compacto verde é um parâmetro que influencia o aparecimento deste defeito. É de salientar que o processo de pré-compactação do pó, relativo a esta configuração, foi realizado manualmente com pouco rigor na medida da carga aplicada, o que induz um erro associado à densidade inicial do compacto verde. Uma vez que estas montagens tinham presente as sondas no interior do reservatório do pó metálico, a prensagem teve de ser realizada com recurso a um macho com secção transversal de meio círculo sendo por isso compactado um lado de cada vez, para não danificar o sistema de medida da velocidade da OC. Este processo conduziu a uma densidade inicial inferior e não uniforme no centro que promoveu o aparecimento do furo central. No topo do tubo, correspondente à zona do compacto ausente de fibras, a pré-compactação já foi realizada com uma macho de secção circular que aplica uma pressão constante na interface com o pó e consequentemente a densidade deverá ter sido mais uniforme e elevada.

A linha de indentações realizada na avaliação da dureza do compacto relativo a MC1 pode ser visualizada na figura 22 (a).

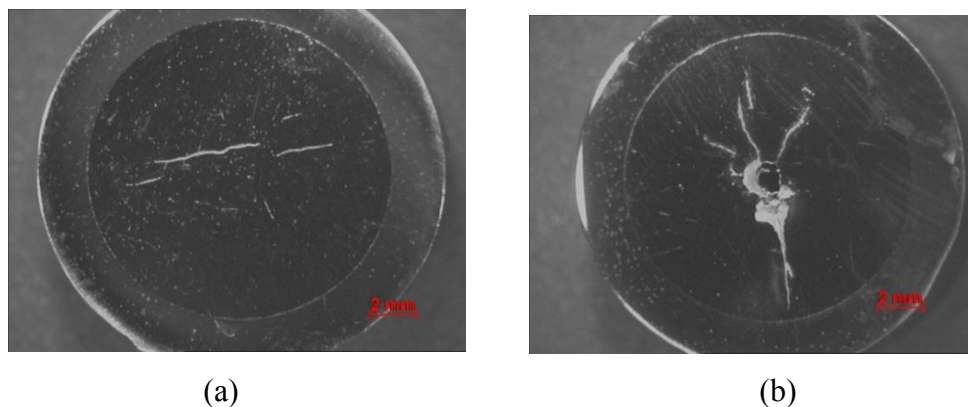


Figura 23. Fotografias exemplificativa dos compactos obtidos por explosão relativos a MC2 ((a)– Corte 1, superfície afastada da sonda (b)-Corte 2, superfície próxima da sonda).

É possível notar em todas as imagens dos compactos resultantes, que o processo gerou densificação do material. O aspecto espelhado da superfície após o polimento comprova o seu cariz metálico.

4.2.2.2. Microscopia óptica

Nas figuras 24 e 25 são apresentadas as microestruturas do produto compactado dinamicamente nos dois ensaios cilíndricos. Em primeiro na figura 24 (a) tem-se a imagem do compacto sinterizado no ensaio inicial sem ataque, de seguida, figura 24 (b) o mesmo compacto atacado quimicamente. O mesmo processo é repetido para o compacto referente a MC2

A partir da análise das micrografias podemos comprovar que os produtos consolidados em ambos os casos apresentam microestruturas idênticas, com superfície homogênea e micro-poros.

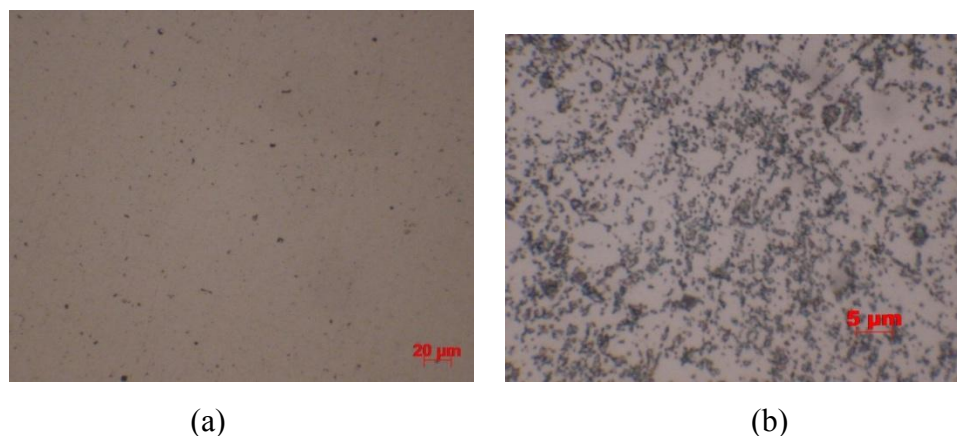


Figura 24. Micrografias com ampliações distintas da superfície dos compacto correspondente a MC1 ((a) – Sem ataque químico (b) - Com ataque químico)

A microscopia óptica das superfícies dos compactos atacados quimicamente com reagente Fry, está apresentada nas figuras 24 (b) e 25 (b). O reagente evidencia as fronteiras de grão existentes e destaca a presença de carbonetos de cromo. É de realçar a ausência da fase ferrítica, presente no pó de partida.

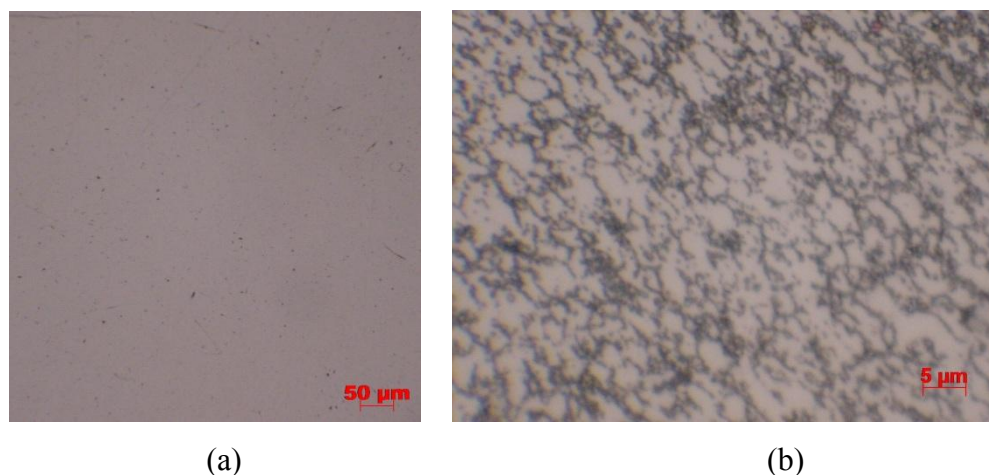


Figura 25. Micrografias com ampliações distintas da superfície dos compactos correspondente a MC1 ((a) – Sem ataque químico (b) - Com ataque químico)

4.2.2.3. Difrração de Raios X (DRX)

A técnica de DRX foi utilizada para determinar as fases presentes no material após explosão. Esta análise foi feita na periferia e na zona central dos compactos. A figura 26 apresenta os difractogramas correspondentes discriminados por zona e referência do ensaio.

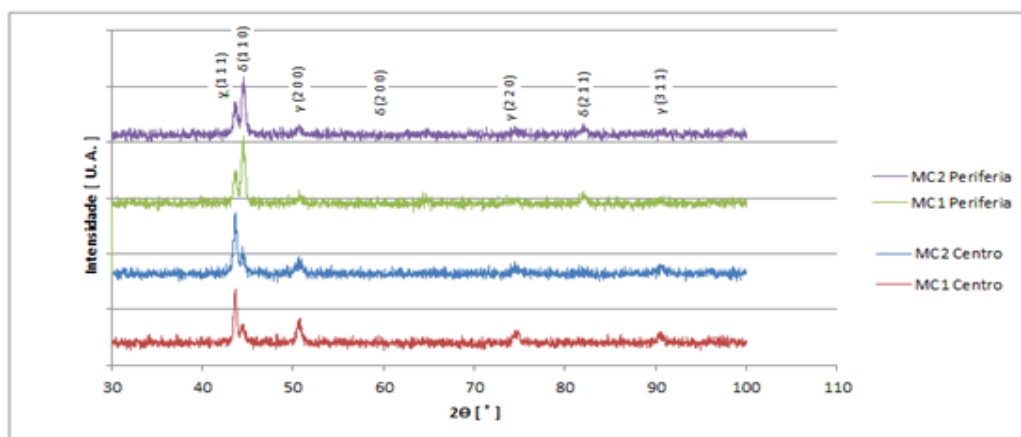


Figura 26. Diffractogramas relativos a MC com identificação das fases presentes.

Na figura 26 é visível a reprodutibilidade dos picos presentes em zonas idênticas. A partir da análise dos mesmos, constata-se que há um decaimento da ferrite- δ , deste pó de aço inox comercial utilizado, e um aumento da austenite da periferia até ao centro. Na zona central, junto ao furo, a fase predominante é austenítica. O aparecimento de austenite justifica-se com a pressão e temperatura superiores que se atingem na zona central, durante o processo de compactação por detonação.

4.2.2.4. Densidade e Ultramicrodureza

A avaliação da densidade do material sinterizado, fez-se através do cálculo da área total de poros presentes nas micrografias analisadas. Os resultados após tratamento dos dados adquiridos pelo *software*, indicam uma porosidade aberta inferior a 1% em ambos os compactos. Em Anexo B, encontra-se o tratamento feito nas micrografias com possibilidade de observar-se o critério de selecção da porosidade com recurso ao *software* de imagem.

O gráfico representativo da evolução da dureza em função das indentações realizadas ao longo do diâmetro dos compactos, é apresentado na figura 27. Note-se que os ensaios realizados partiram da periferia do compacto percorrendo-o até á outra extremidade. A zona central do compacto (zona de fissuras) está indicada na figura, enquanto a periferia é avaliada nas indentações mais próximas da primeira e última indentação. Os resultados são superiores aos valores expectáveis no material sólido. É possível comprovar a semelhança entre os valores de dureza dos materiais compactados nos diferentes ensaios. No segundo ensaio os resultados são mais heterogéneos, em termos de dureza, que no primeiro que leva a crer que este ensaio de ultramicrodureza foi o mais afectado pela porosidade.

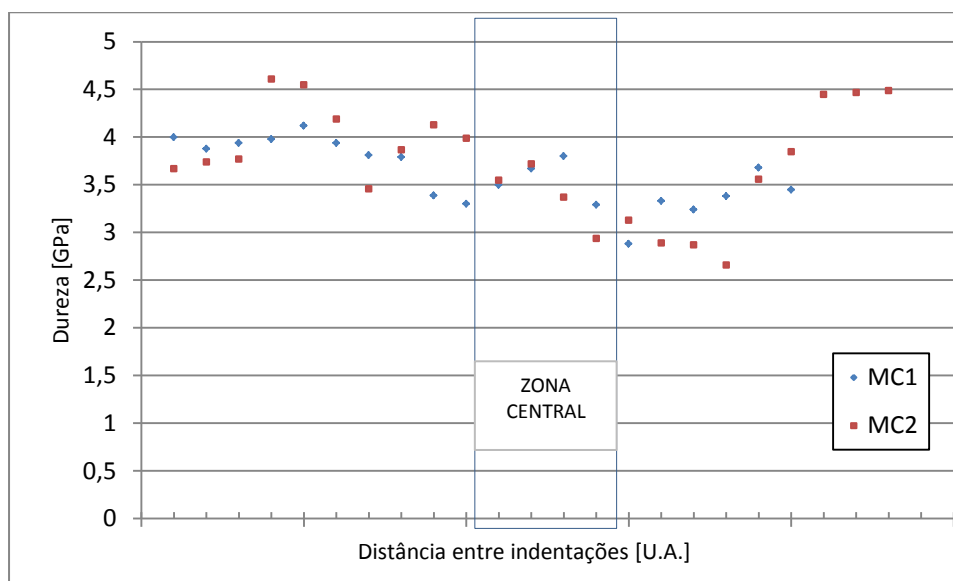


Figura 27. Diagrama da evolução dos valores de Dureza medidos em várias indentações

Na tabela 7 são apresentados os valores médios de porosidade aberta e de dureza referentes ao aço compactado nesta configuração do processo. Os valores de dureza são afectados pela porosidade presente no material.

Tabela 7. Tabela de valores de dureza e de porosidade aberta relativa aos ensaios com montagem cilíndrica.

	MC1	MC2
Porosidade aberta na superfície [%]	0,35	0,29
Dureza [GPa]	3,6	3,7

4.3. Caracterização das Ondas de Choque

O objectivo subjacente à caracterização da propagação da onda de choque nas diferentes montagens estudadas está relacionado com a verificação do efeito da velocidade da onda e a pressão exercida, nas características finais do compacto de aço.

4.3.1. Resultados da THOMSON

Nesta secção presente são apresentados os fotocronogramas típicos resultantes da aplicação da metodologia experimental para os vários ensaios realizados nesta investigação.

a) Configuração plana

A disposição das figuras é iniciada com a demonstração de resultados relativos ao segundo ensaio e posteriormente relativos ao terceiro com o tipo de configuração plana. Neste tipo de configuração é possível localizar temporal e espacialmente a frente da onda de choque e assim determinar a sua velocidade de propagação seguindo a metodologia descrita para tal no Capítulo 3. Nas figuras 28 e 29 pode observar-se uma representação esquemática ilustrativa do princípio de funcionamento do método de medida na configuração plana descrita na secção 3.3.4.

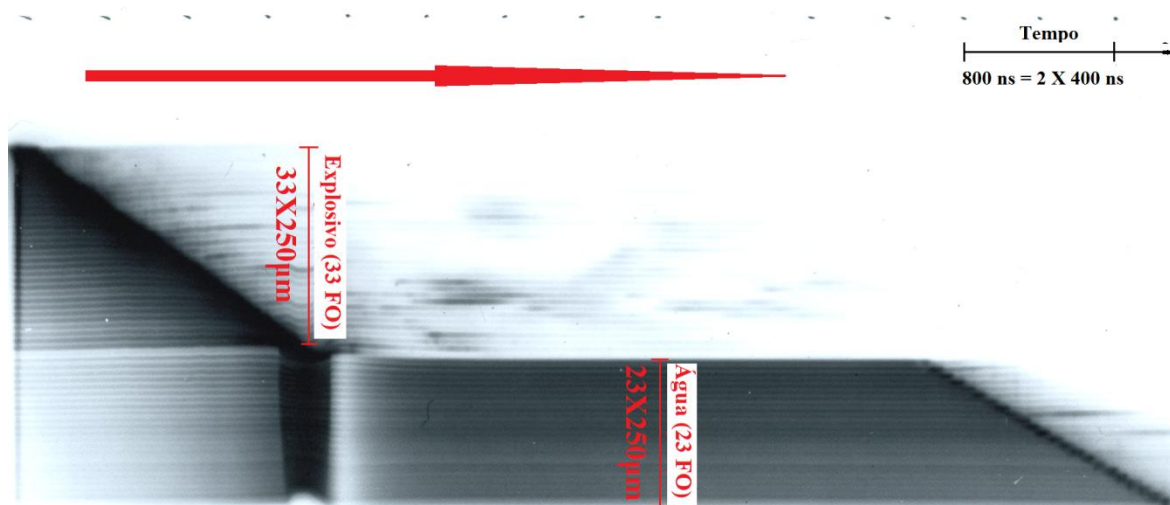


Figura 28. Fotocronograma típico do processo de propagação da onda de choque em água e no explosivo utilizado na configuração plana no segundo ensaio (MP2).

Apesar do procedimento para a determinação da velocidade de propagação da onda de choque parecer simples, a verdade é que, quando se observa um fotocronograma típico, surgem dúvidas quantos aos instantes a considerar como sendo da propagação da onda. Um sistema de procedimentos e de critérios foram adoptados para a determinação dos referidos instantes.

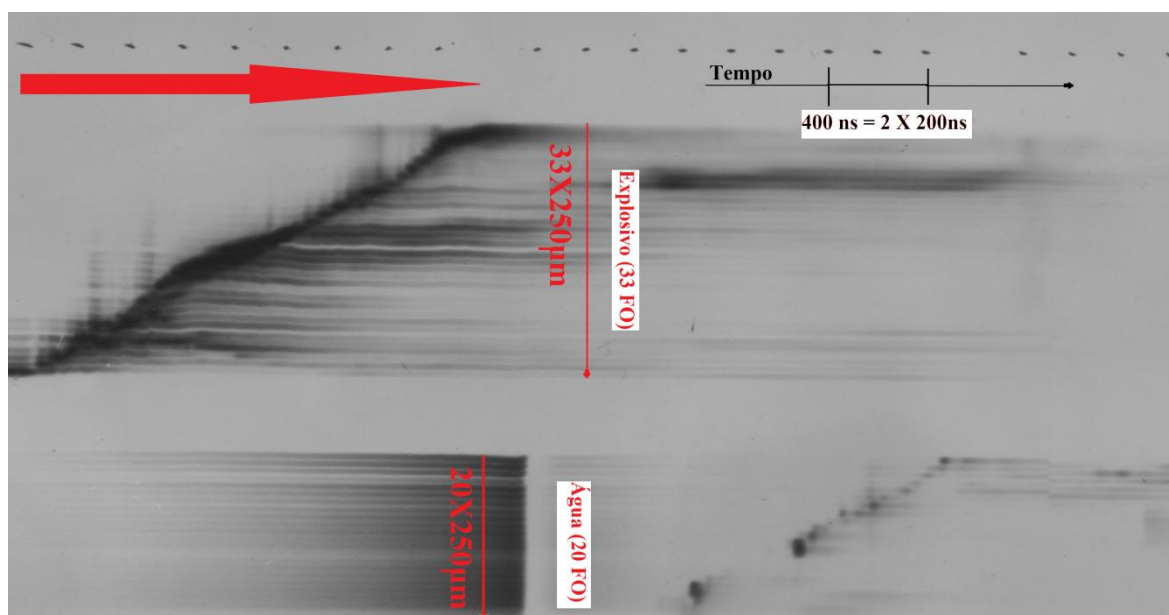


Figura 29. Fotocronograma típico do processo de propagação da onda de choque em água e no explosivo utilizado na configuração plana no terceiro ensaio. (MP3)

b) Configuração cilíndrica

Os fotocronogramas típicos do processo de avaliação da intensidade e da forma da onda de choque produzida em cada uma das anteriormente referidas configurações cilíndricas, resultantes da aplicação da metodologia experimental idêntica à da secção 3.3.4., são apresentados nas figura 30 e 31.

Na Figura 30 é de notar a falta de resolução do fotocronograma do primeiro ensaio. No conjunto de sinais correspondentes à propagação da onda de detonação do explosivo, como é visível, não há aquisição de dados relevantes para este estudo. Previa-se que os sinais de luz fossem adquiridos pelas janelas equidistantes, da fita de fibras ópticas, formando um conjunto de sinais espaçados no tempo. A disposição dos sinais adquiridos durante a propagação da onda de choque na amostra de pó de aço, revelam um registo, mas não completo, da passagem da onda por uma das janelas projectadas no conjunto de fibras, que nos dá um primeiro parecer da forma da frente de onda. Este registo está assinalado na imagem com o auxílio de setas vermelhas consecutivas.

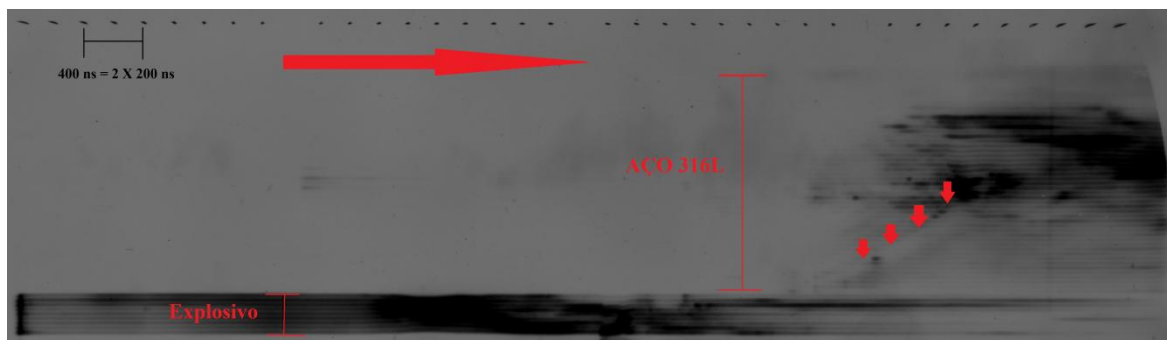


Figura 30. Fotocronograma típico do processo de propagação da onda de choque na amostra do pó de aço do tipo 316L para um nível de solicitação determinado pelo uso do gerador de ondas no primeiro ensaio com configuração cilíndrica (MC1).

No fotocronograma apresentado na figura 31, as linhas de luz correspondentes à passagem da onda de choque pelas zonas activas das fibras, ou seja, pelas janelas sucessivas, assinaladas por setas de cor verde, pelo que, a avaliação do tempo que separa duas linhas consecutivas tornam possível a determinação da velocidade média da propagação da onda do explosivo (D).

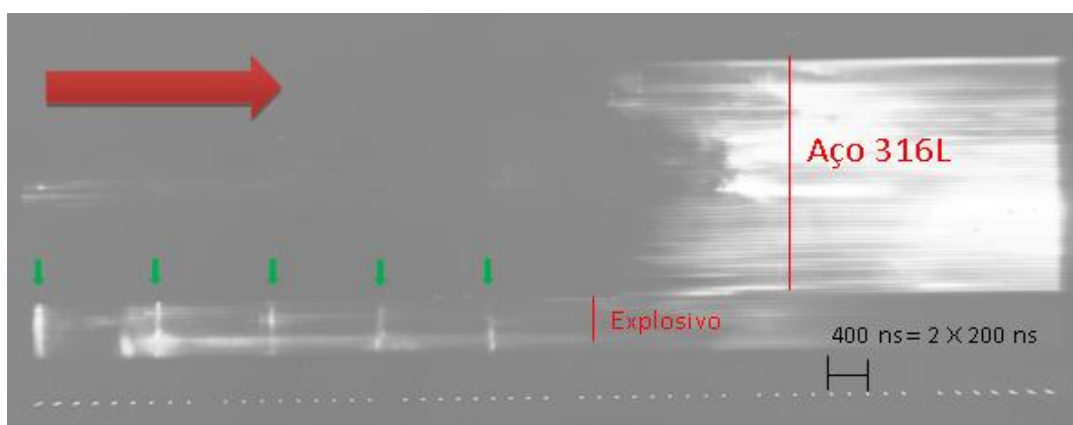


Figura 31. Fotocronograma típico do processo de propagação da onda de choque na amostra do pó de aço do tipo 316L para um nível de solicitação determinado pelo uso do gerador de ondas no primeiro ensaio com configuração cilíndrica (MC2).

4.3.2. Propriedades da Onda de Choque

a.1) Montagem Plana - Explosivo

Tendo como objectivo a determinação da Curva de Hugoniot, fez-se, de modo sistemático a avaliação da velocidade de propagação da onda de choque, através do ajuste

de uma função linear aos pontos $x-t$ referentes à distância de propagação pretendida e calculando de seguida o valor da derivada dessa função.

A análise dos fotocronogramas permitiu determinar os diagramas $x-t$ de propagação da onda de choque no explosivo e na água apresentados nas figuras 32 e 33.

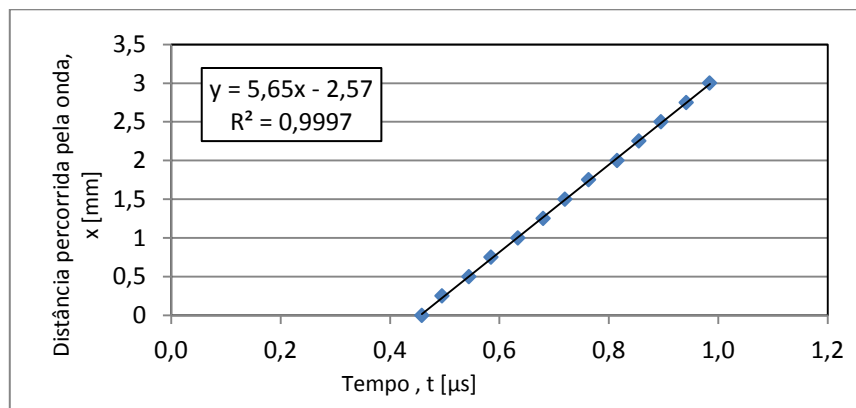


Figura 32. Diagrama $x-t$ da propagação da onda de choque (nos últimos 2,75 mm) no explosivo obtido a partir do fotocronograma relativo ao ensaio MP2 apresentado na figura 28.

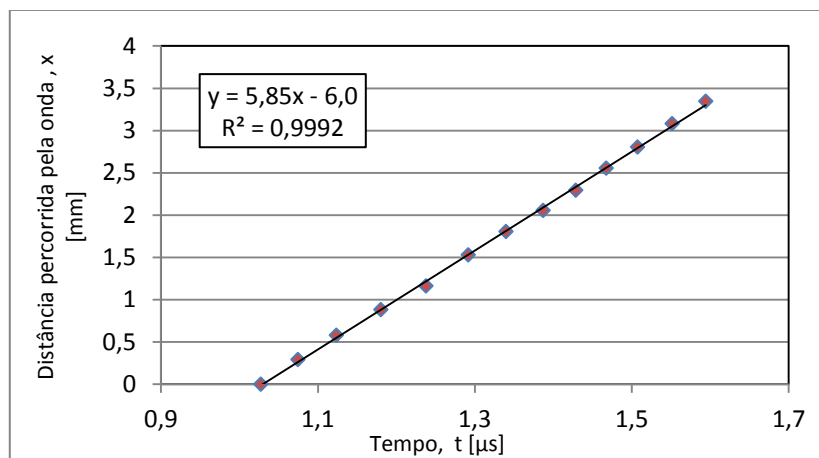


Figura 33. Diagrama $x-t$ da propagação da onda de choque (nos últimos 2,75 mm) no explosivo obtido a partir do fotocronograma relativo ao ensaio MP3 apresentado na Figura 29.

Uma vez conhecidos os diagramas $x-t$ da velocidade de propagação da onda de detonação do explosivo, e, feito o ajuste de uma função linear, aos pontos referentes a ambos os ensaios, calculou-se o valor da derivada dessas funções. Os resultados dos dois ensaios são apresentados no diagrama da figura 34.

A variação da velocidade de propagação da onda de choque com a distância percorrida apresenta um comportamento que está de acordo com o que seria de esperar para este tipo de explosivo com esta densidade. É de notar o valor idêntico da velocidade

média de detonação, nos dois ensaios, a partir das equações da regressão linear expostas nos diagramas $x-t$.

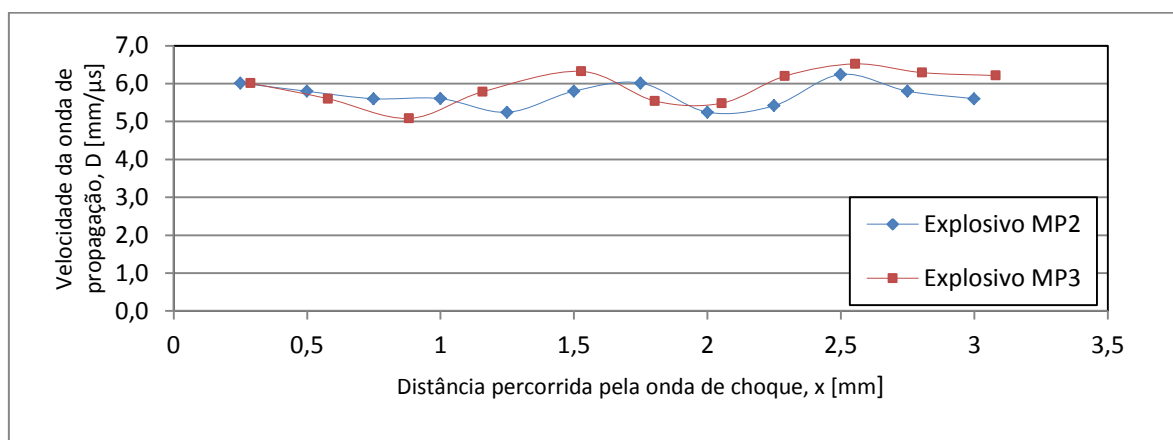


Figura 34. Variação da velocidade da onda de choque em função da distância percorrida.

a.2) Montagem plana - Água

A avaliação da progressão da onda de choque na água só foi possível no segundo ensaio deste tipo de montagem (MP2) e fez-se de modo semelhante ao anterior. Os diagramas, assim determinados, são representados nas figuras 35 e 36.

A variação da velocidade de propagação da onda de choque ao longo da coluna de água apresenta um comportamento que está de acordo com o que seria de esperar num material não reactivo, como é o caso. É de notar a atenuação da velocidade ao longo da distância percorrida, ou seja dos 15 aos 20 mm, valores correspondentes ao comprimento da sonda aplicada na coluna de água, o que implica uma diminuição da pressão associada a este processo na ordem dos 5 GPa. Esta variação de pressão vai de acordo com resultados análogos adquiridos, em múltiplos ensaios, por Manikandan e colaboradores (2010), com a vantagem de ter sido determinada com a realização de somente uma experiência. A título de exemplo, é apresentado o diagrama $P-x$ da propagação da onda de choque na água, determinado a partir das relações de Hugoniot, na figura 37.

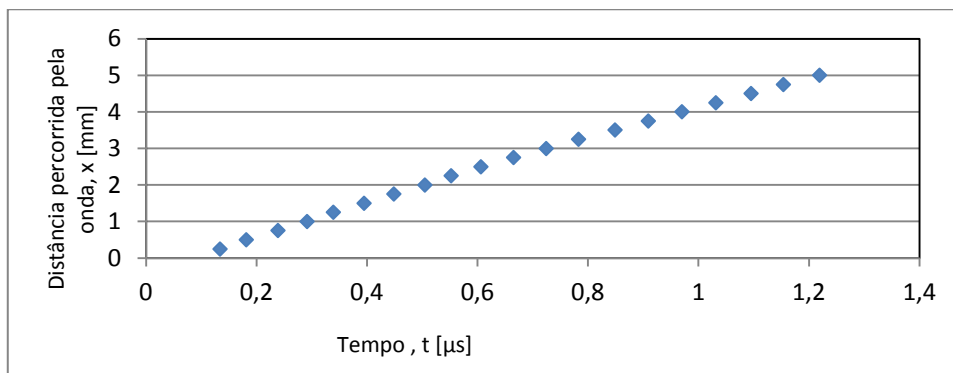


Figura 35. Diagrama x-t da propagação da onda de choque (nos últimos 5 mm) na água obtido a partir do fotocronograma relativo ao ensaio MP2 apresentado na Figura 28.

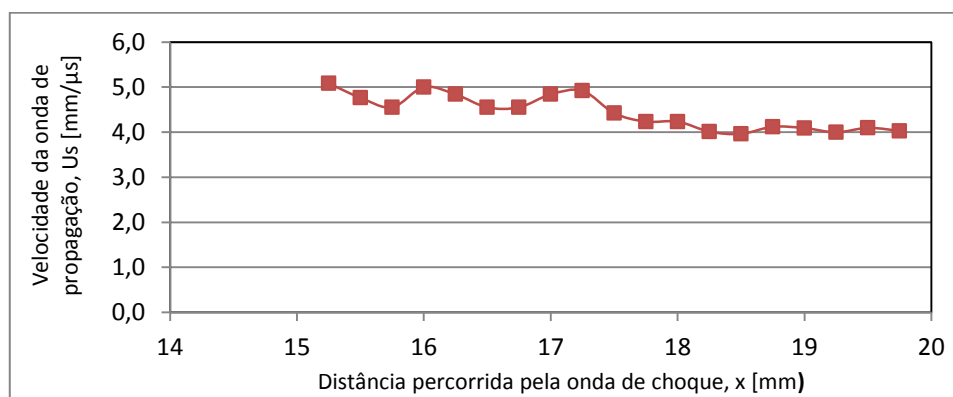


Figura 36. Variação da velocidade da onda de choque em função da distância percorrida.

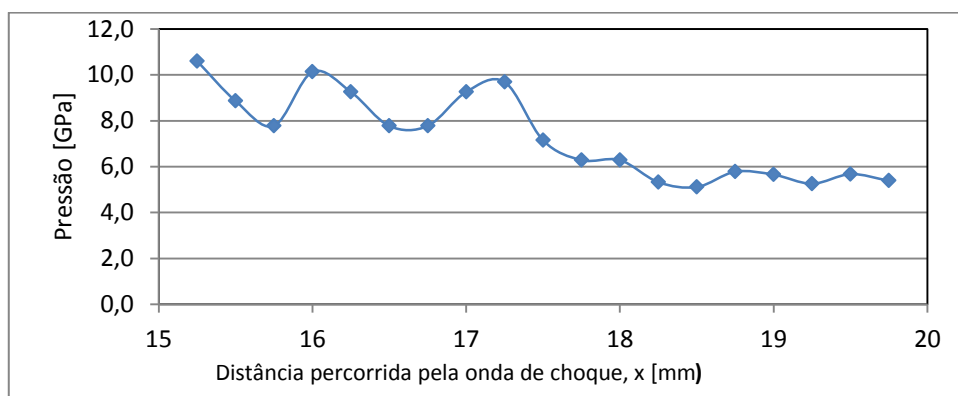


Figura 37. Variação da pressão da onda de choque em função da distância percorrida.

Conhecido, o valor médio da velocidade de propagação da onda de choque aquando a passagem da frente de luz pelas três últimas fibras da sonda presente na coluna de água, estima-se o valor da velocidade na iminência da transição da água para o reservatório. Fazendo uso da técnica de adaptação de impedâncias é possível prever os valores de pressão nas interfaces sucessivas ao longo da montagem. Na figura 38 é

apresentado uma representação esquemática deste processo onde é visível a interface entre a água e a tampa metálica de aço inox presente no reservatório, entre a tampa e o cobre, e a definida entre o cobre e o pó de aço. É de salientar, que a necessidade da introdução do cobre, esclarecida na secção 4.2.1.1., impossibilitou a aplicação deste método no que diz respeito ao aço 316L, visto não existir qualquer estudo conhecido da propagação de ondas de choque através do cobre.

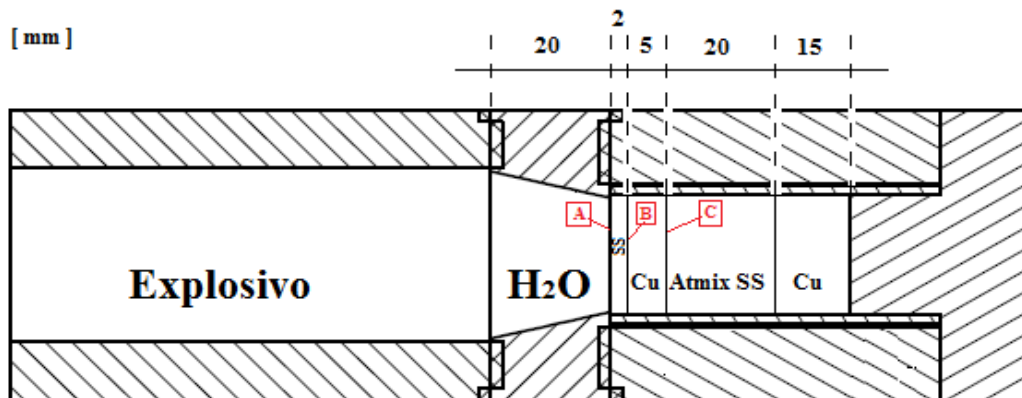


Figura 38. Representação esquemática da montagem com a indicação das interfaces presentes.

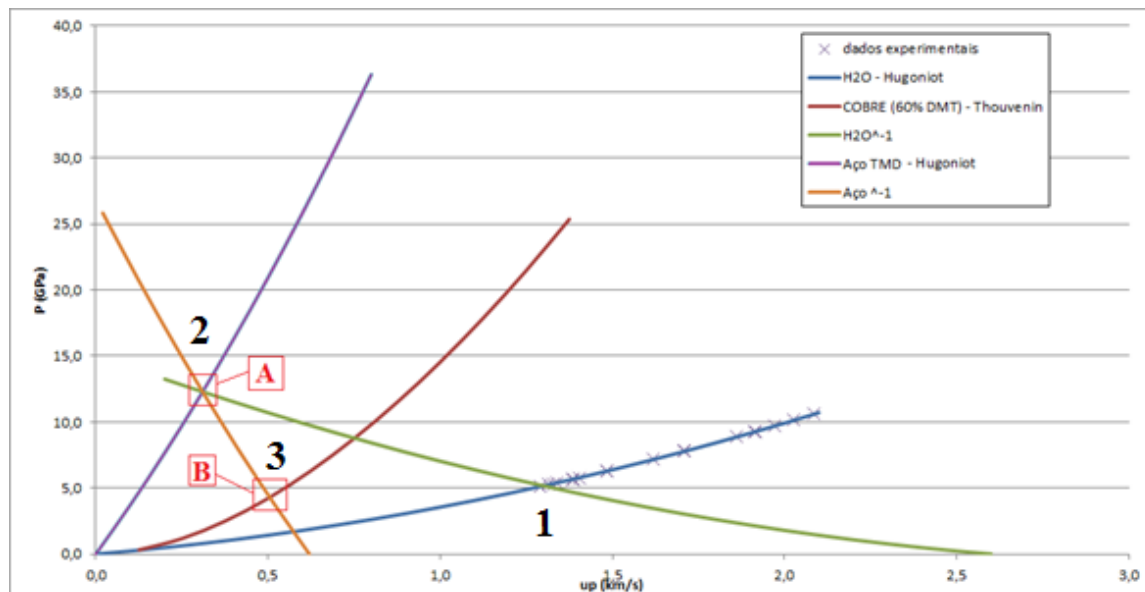


Figura 39. Método de adaptação de impedância aplicado à propagação da onda de choque da água para o cobre ($5,34 \text{ g/cm}^3$).

A representação gráfica da aplicação deste método é apresentada na figura 39 através do diagrama $P-u_p$. É possível constatar uma onda de choque a propagar-se na água, caracterizada por um valor de pressão P_1 de cerca de 5 GPa e por uma u_{p1} de valor

sensivelmente igual a 1,3 km/s, que ao atingir a interface entre água com a tampa, induziu nesta uma onda de choque de amplitude P_2 na ordem dos 12 GPa. Continuando a análise estima-se que a onda de choque incute sobre o cobre uma pressão P_3 de cerca de 4 GPa. Pode prever-se uma pressão da OC no aço inferior à pressão atingida no cobre.

É de realçar que tomou-se a liberdade de não reportar os resultados relativos ao terceiro ensaio plano (MP3), devido a velocidade parecer aumentar, ao contrário de expectante para a coluna de água com 10 mm. O facto de o ângulo de convergência ser maior, pode ser a causa dos resultados atípicos.

b) Montagem cilíndrica

O processo de avaliação da progressão da onda durante os ensaios cilíndricos descrito anteriormente, baseia-se na aquisição de linhas de luz, através das janelas aplicadas na sonda óptica, que estão directamente relacionadas com o atraso com que a frente da OC chega aos diferentes pontos da interface destas zonas activas da sonda, permitindo ter uma ideia da sua forma.

A figura 40 corresponde ao registo feito pela sonda presente na emulsão explosiva e permite visualizar a planearidade da onda de choque, durante o processo de detonação, a partir da forma recta das linhas de luz que comprova que a passagem da frente de onda pelas janelas acontece toda no mesmo instante temporal.

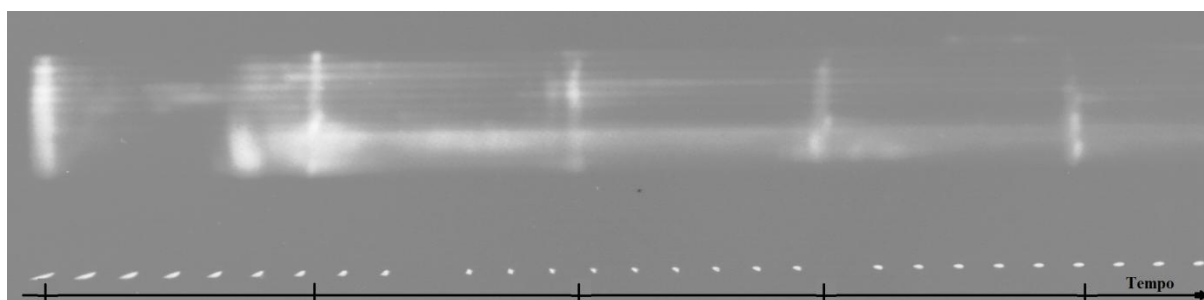


Figura 40. Pormenor do registo das linhas de luz aquando a passagem da frente de detonação pelas 5 janelas da sonda aplicada no ensaio MC2.

A avaliação da velocidade de propagação da onda de detonação neste tipo de montagem, fez-se, seguindo o mesmo processo aplicado para a avaliação da propagação da onda de detonação na configuração plana, sendo possível determinar-se o diagrama $x-t$ da

propagação da frente de onda do explosivo durante o processo cilíndrico e a sua variação de velocidade.

Os resultados da aplicação da metodologia podem ser observados no gráfico da figura 41.

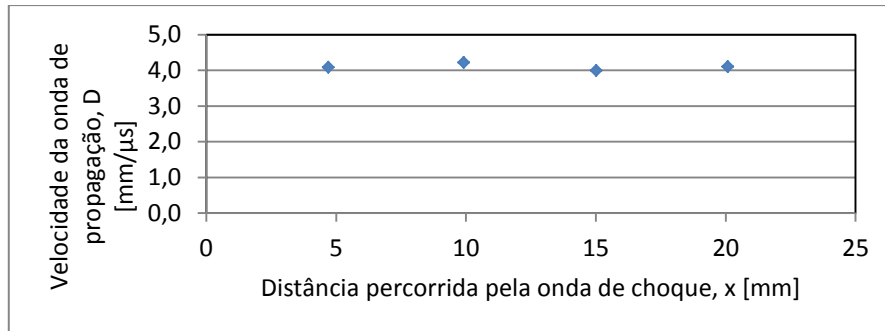


Figura 41. Variação da velocidade da onda de choque em função da distância percorrida.

É possível constatar a linearidade da variação da velocidade ao longo da distância percorrida pela OC. O valor médio da velocidade calculado é de cerca de 4,1 mm/μs e está dentro do expectante para uma emulsão explosiva com esta densidade de acordo com os resultados do estudo realizado por Mendes R. e colaboradores (2010).

Segundo Carton (1997), na típica configuração cilíndrica, o pó é compactado por uma onda de choque axi-simétrica iniciada pela frente de detonação que se move axialmente através da massa de explosivo circundante. O ângulo entre a frente da OC no pó e do eixo do cilindro é uma função da relação entre a velocidade da OC, U_s , e a velocidade de detonação, D , como é mostrado na figura 42.

$$\sin \alpha = \frac{U_s}{D} \quad (9)$$

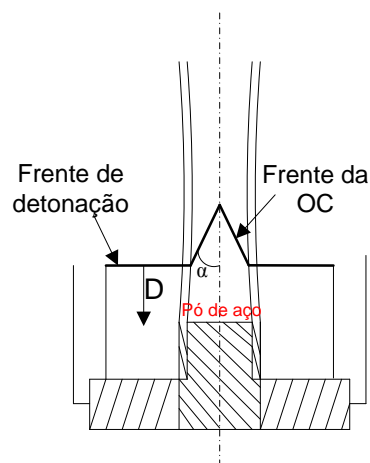


Figura 42. Frente de detonação e frente da onda de choque durante o processo cilíndrico de compactação

É possível visualizar em pormenor, na figura 43 (a), o único registo da linha de luz do fotocronograma adquirido durante o processo cilíndrico de compactação, que é apresentado na figura 30. A análise realizada para efeito da determinação do ângulo da onda de choque, iniciou-se pelo ajuste de uma função linear aos pontos do diagrama das medidas dos sinais adquiridos, apresentado na figura 43 (b), procedendo-se depois à aplicação das relações trigonométricas na determinação do ângulo da OC. O ângulo determinado tem um valor de sensivelmente 47.9° .

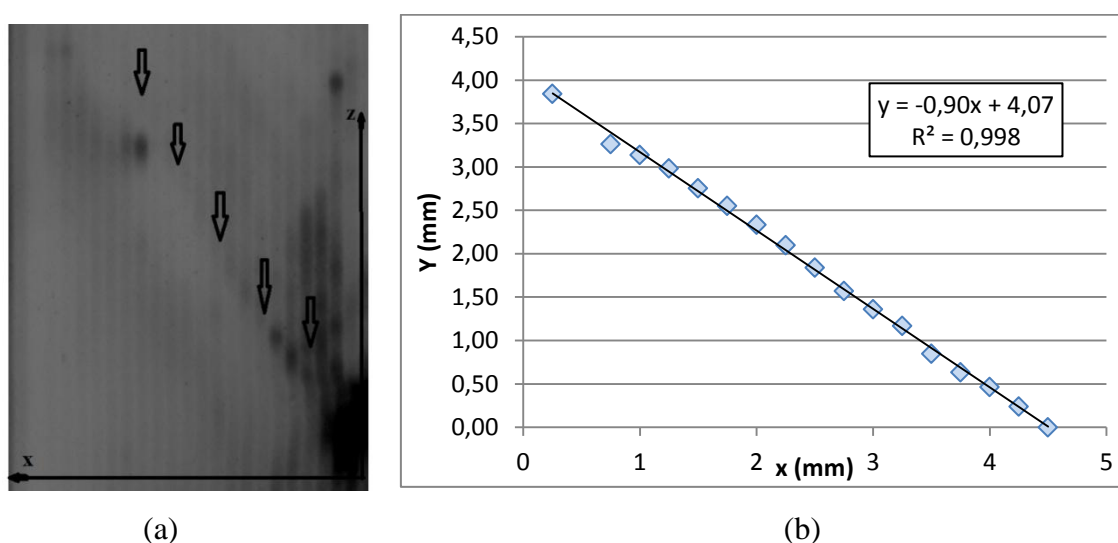


Figura 43. Forma da Onda de choque no contentor de pó ((a)- Pormenor da forma da frente da OC no registo do fotocronograma da figura 30 (b) –Medidas da forma da OC cónica convergente)

Conhecido o ângulo da OC, a velocidade de propagação da frente de onda, U_s , foi determinada recorrendo à equação 9, e estimou-se ser de cerca de $3.04 \text{ mm}/\mu\text{s}$. O correspondente valor de pressão foi determinado seguindo a metodologia utilizada para materiais porosos descrita na secção 3.5., e atinge valores na ordem dos 16.8 GPa .

5. CONCLUSÃO

Neste capítulo será feita uma apresentação dos principais contributos da dissertação para o conhecimento e desenvolvimento na área de compactação dinâmica de pós micrométricos.

Após o estudo do processo de compactação dinâmica a partir de duas configurações de montagens distintas, pode-se concluir que no caso da montagem plana, a atenuação da intensidade da onda durante o processo, impossibilitou a consolidação do material, sendo este o parâmetro que mais influencia a densidade do produto final. No que diz respeito ao processo cilíndrico, as características mecânicas do aço 316L após detonação são acima do expectante, quando comparado com o mesmo aço comercial, o que comprova o grande potencial desta configuração do processo no que diz respeito à produção de um aço austenítico 316L a partir de pós micrométricos para aplicação em microtecnologia, face aos processos convencionais de sinterização.

A utilização da referida metodologia experimental, na avaliação do comportamento da onda de choque originada pela detonação de um explosivo durante o processo, contribuiu para os estudos do aço quando sujeito à compressão por choque. Ao relacionar uma resolução temporal, na ordem do nanossegundo, com uma resolução espacial da ordem das poucas dezenas do micrómetro, esta metodologia permitiu avaliar o efeito de parâmetros como a pressão da frente de onda e sua velocidade, têm nas características do produto final. Pode-se considerar que este tipo de material se encontra bem caracterizado ao nível do comportamento dinâmico neste tipo de processo de compactação e que a técnica experimental utilizada possui grande potencial na investigação dos fenómenos das ondas de choque.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Brundle R. C., Evans C. A. Jr., Wilson S., “Encyclopedia of Materials Characterization”, 1992.

Carton E. P., “Shock Compaction of Ceramics and Composites”, 1997.

Chiaverini V., “Tecnologia Mecânica vol. II – Processos de Fabricação e Tratamento”, McGraw-Hill, 1986

Chiba A., Fujita M., Nishida M., Iamurra K., Tomoshige, “ Shock-Wave and High-Strain-Rate Phenomena in Materials”, Meyers M. A., Murr L. E., Staudhammer (Marcel dekker, New York, 1992).

Farinha A. R. T. S., “Processamento de Pós Submicrométricos e Nanométricos por Detonação”, Departamento de Engenharia Mecânica Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2008

Hayes D. B., “Introduction to stress wave phenomena”, 1973

Hokamoto K., Tanaka S., Fujita M., “Optimization of the experimental condition for high-temperature shock consolidation. J. Impact Eng 24, 2000.

Hokamoto K., Lee J. S., Fujita M., Itoh S., Raghukandan K., “The synthesis of bulk Material Through explosive compaction for making intermetallic compound Ti_5Si_3 and composites”, Journal of Materials Science 37, 2002.

Hofmann, R., Andrews, D. e Maxwell, D. “Computed shock response of porous aluminium”, Journal of Applied Physics. . 1968.

Hokamoto K., Tanaka S., Fujita M., Zhang R., Kodama T, Awano T., Ujimoto Y., “An improve high temperature shock compression and recovery system using underwater shock wave for dynamic compaction of powders. J. Mater. Process. Technol. 85, 1999.

Lennon, C. R. A., An Investigation of Mechanism and Controlling Parameters In Direct Explosive Compaction of Powder Metals. Ph. D. Dissertation. Queen University, Belfast, 1979.

Mamalis A. G., “Technological aspects of high-T-c superconductors”, *Journal of Materials Processing Technology*, 2000.

Manikandan P., Nayeem A., Raghukanfan K., Mori A., Hokamoto K., “Underwater shock consolidation of Mg-Sic Composites”, *J. Mater Sci*, 2010.

Marsh, S., “*LASH Shock Hugoniot data*”, University of California Press, Berkeley, EUA, 1980.

McQueen, R., Marsh, S., Taylor, J., Fritz, J. e Carter, W., “The equation of state of solids from shock wave studies” *high-velocity impact phenomena*, edição de R., Kinslow, Academic Press, New York, EUA, 1970.

Mendes R., Ribeiro. J., Plaksin I., Campos J., “Non ideal detonation of emulsion explosive mixed with metal particles”, 2010

Meyers M. A., Wang S., L., “An improved method for shock consolidation of powders”, *Acta Metallurgica*, 1987.

Prummer R. A., “Last Results in Explosive Compaction of Metal & Ceramic Powder and their Mixtures” 4th International of Center of High Energy Forming in Estes Park/Co. 1973.

Ribeiro J. M. B. M. S., “Propagação de Ondas de Choque em Espumas Sintáticas”, Departamento de Engenharia Mecânica Faculdade de Ciências e Tecnologia da Universidade de Coimbra, 2002

Thouvenin, J, “Effect of a shock wave on a porous solid”, *Fourth International Symposium on Detonation*, ACR-126, Office of Naval Research, Department of the Navy, Washington DC, EUA, 1965.

Zohoor M., Mehdipoor A., “Explosive compaction of tungsten powder using a converging underwater shock wave”, *Journal of Materials Processing Technology*, 2008

7. ANEXO A

“Boiling Test”

Depois de determinar as massas das amostras secas (m_0), colocam-se num copo com uma rede no fundo localizada a 1 cm, aproximadamente do fundo do copo. Cobre-se a rede com água destilada. Põe-se a água a ferver durante 5 horas. Depois de a água estar fria. Tiram-se as amostras e pesam-se em suspensão (m_w). Passam-se as amostras num pano húmido e pesam-se de novo (m_h).

A densidade das amostras é obtida através da seguinte expressão:

$$\rho = \frac{(m_0 \times \rho_w)}{(m_h - m_w)}$$

8. ANEXO B

Porosidade

O presente anexo diz respeito à análise da porosidade aberta a partir de micrografias dos compactos obtidos por compactação dinâmica com configuração cilíndrica com recurso a *software* de tratamento de imagens. As figuras seguintes representam o critério de selecção de porosidade nas superfícies dos compactos fotografados. Nas tabelas são apresentados os valores calculados depois da análise fotográfica.

Tabela 1

Ref. Ensaio	MC1			
Figura	1	2	3	4
Poros [%]	0,57	0,21	0,27	0,34

Média da
Porosidade 0,35%

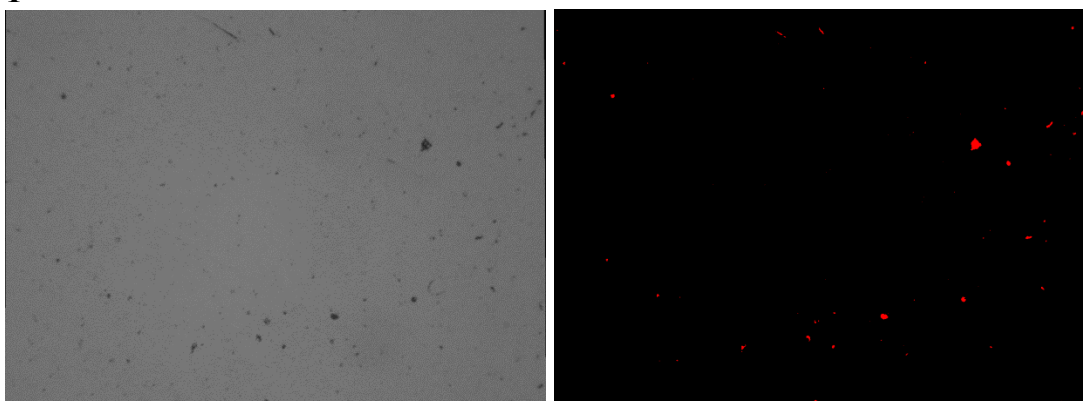
Tabela 2

MC2				
5	6	7	8	9
0,14	0,14	0,42	0,14	0,63

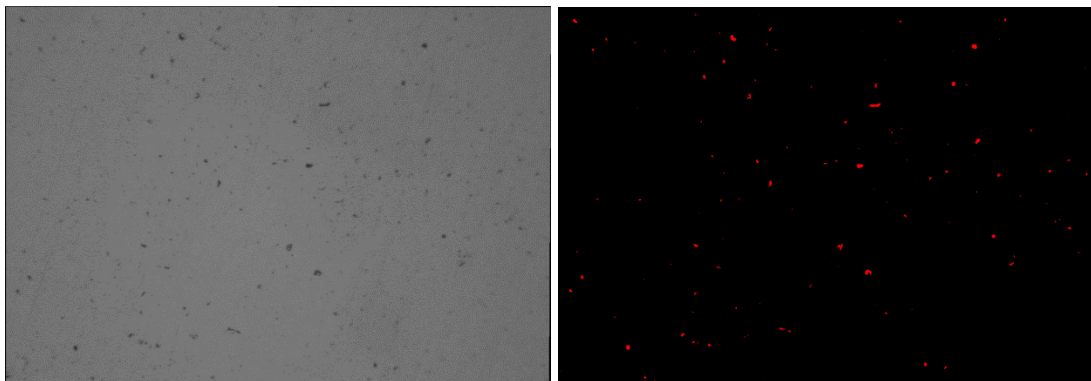
0,29%

Conjunto de Micrografias relativo ao ensaio MC1:

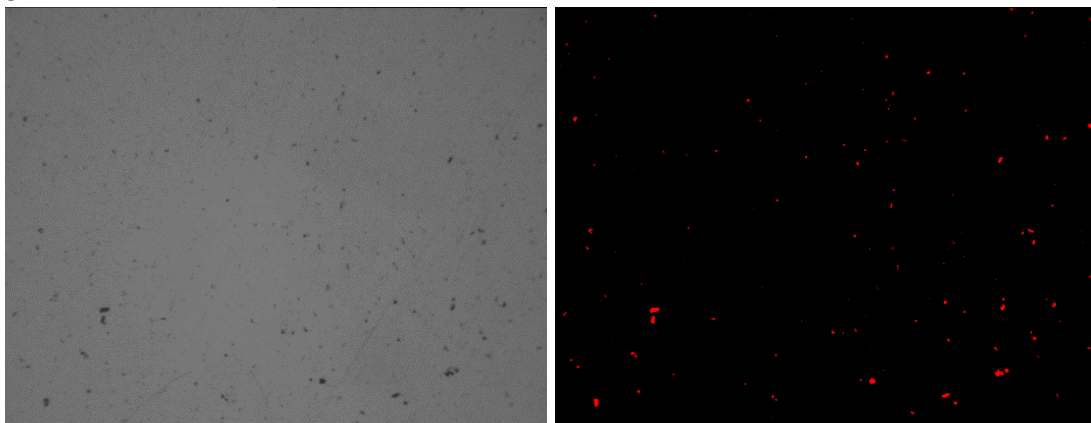
1



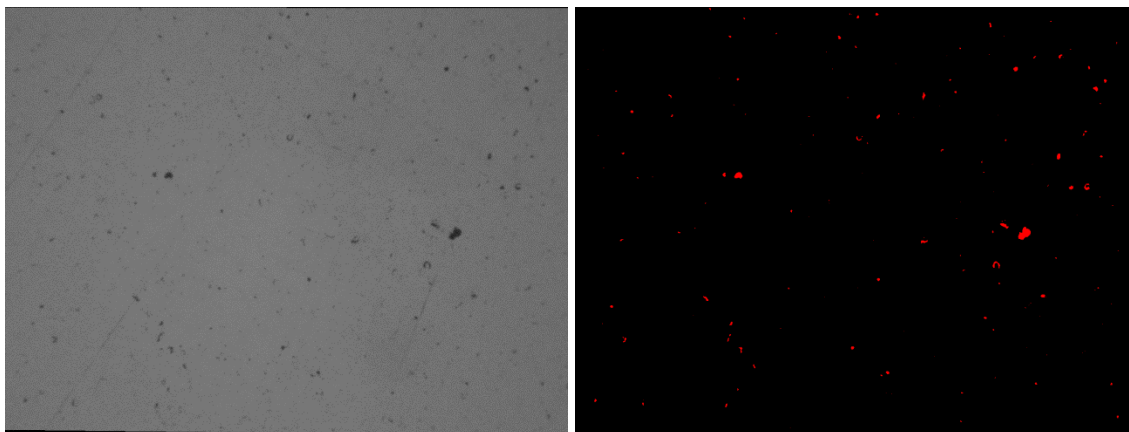
2



3

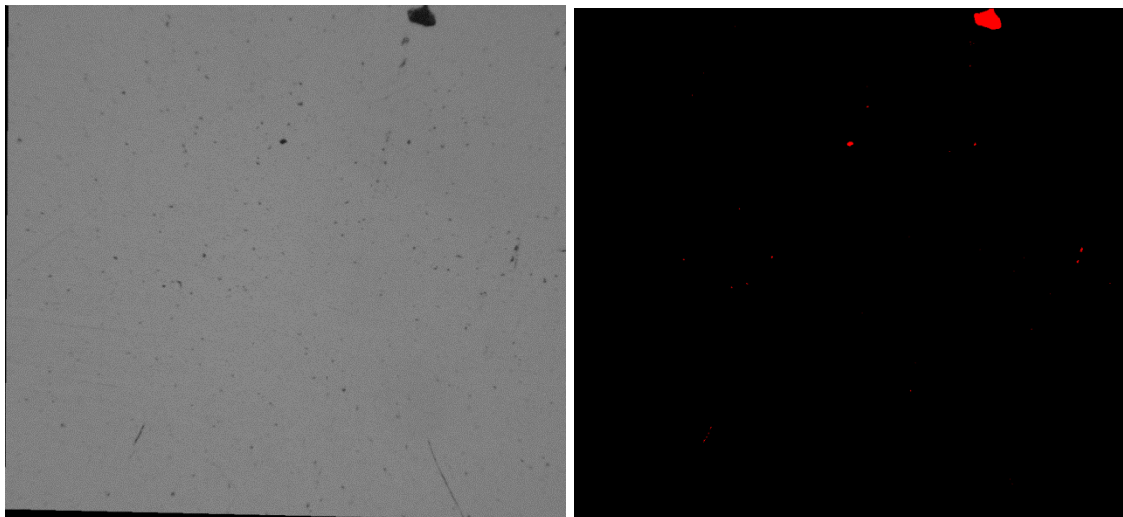


4

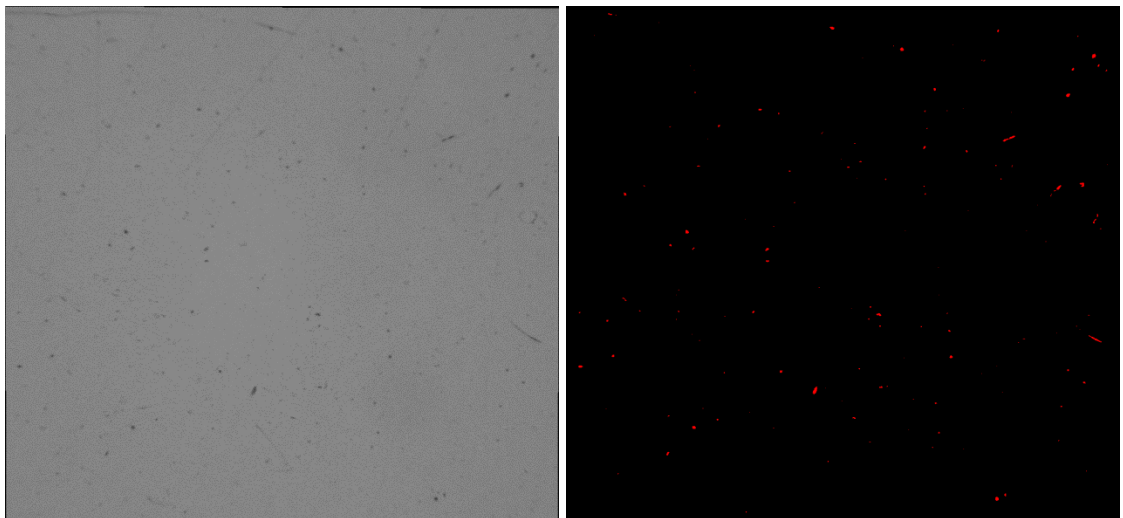


Conjunto de Micrografias relativo ao ensaio MC2:

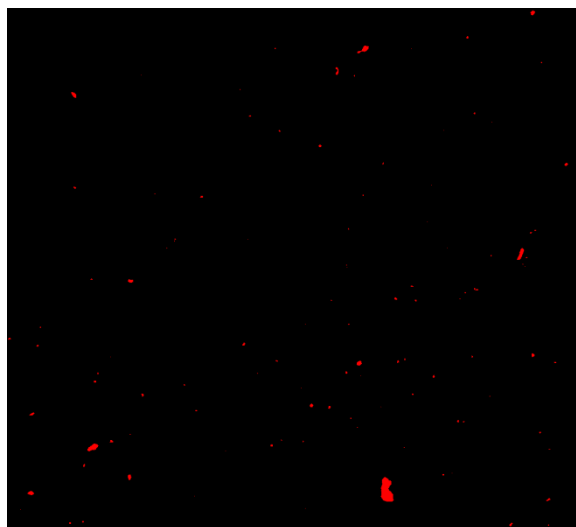
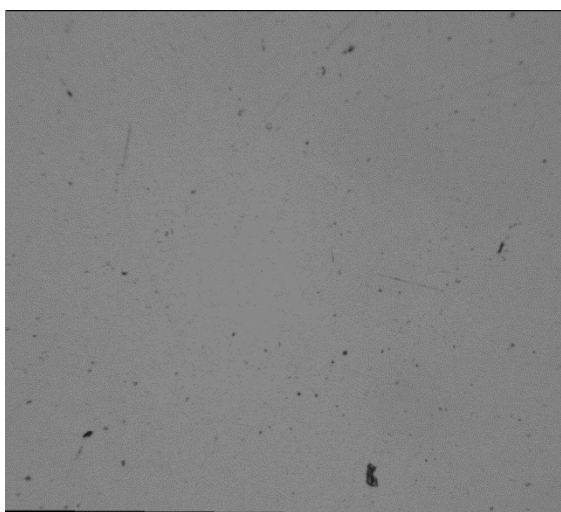
5



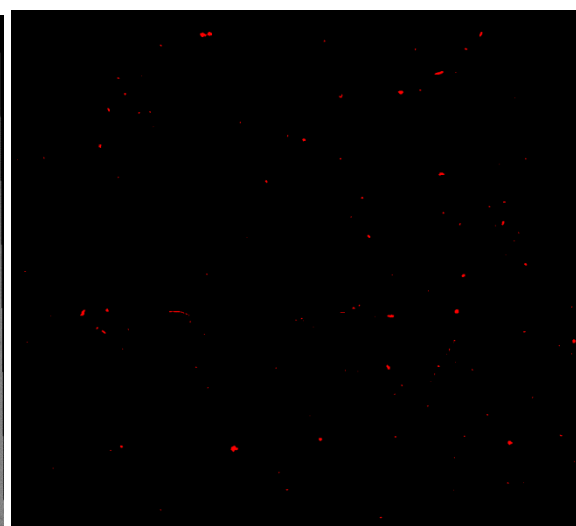
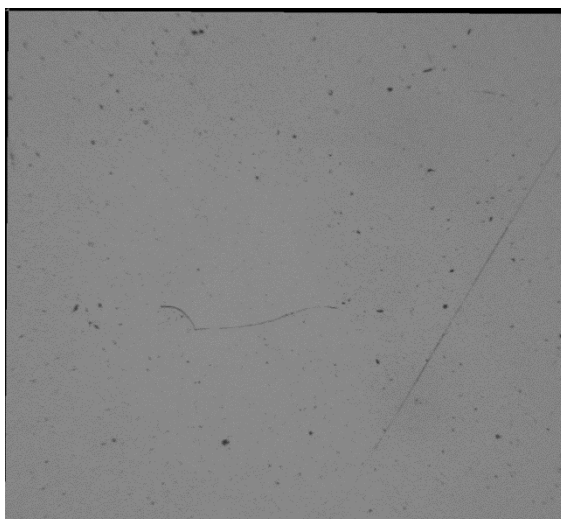
6



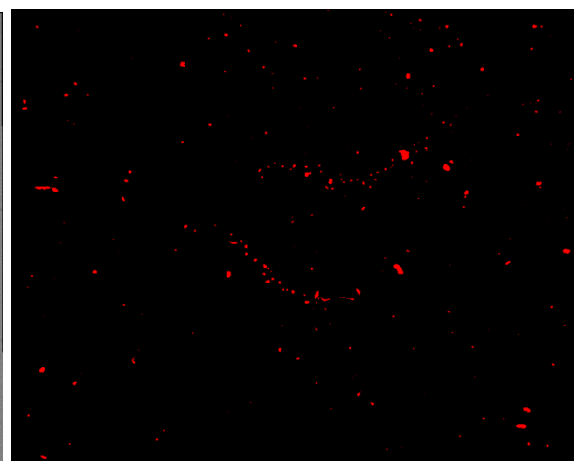
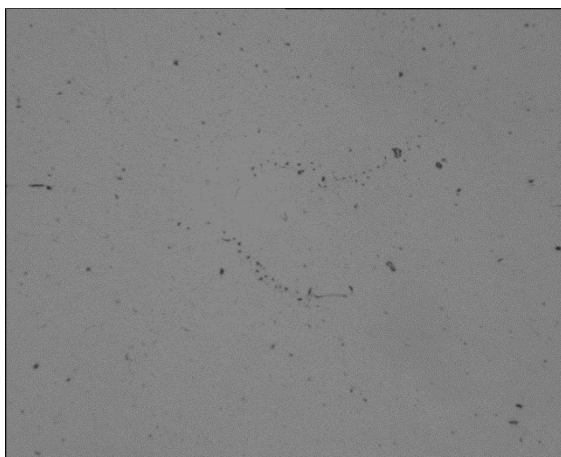
7



8



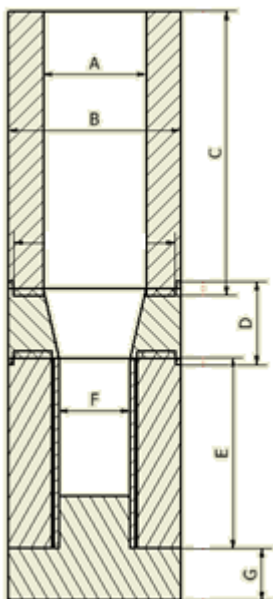
9



9 ANEXO C

Desenhos de projecto e suas medidas

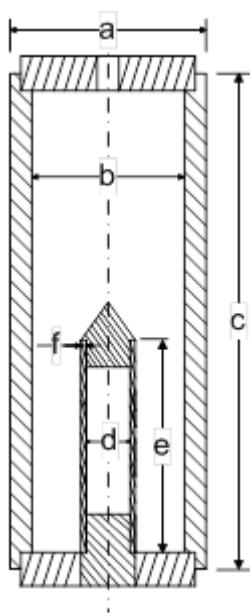
Montagem Plana:



[mm]	MP1	MP2	MP3
A	30	30	30
B	50	50	50
C	80	80	120
D	20	20	10
E	55	55	55
F	21	13	13
G	15	15	15

É de referir que para uma altura da coluna de água, D , de 20 mm o ângulo de convergência é de 14° , enquanto para uma altura de 10 mm o ângulo é igual a 36.9° .

Montagem Cilíndrica:



[mm]	MC1	MC2
a	50	50
b	40	40
c	180	180
d	13	13
e	65	65
f	1.5	1.5