

Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Ricardo Jorge Costa Portugal

Projeto de um sistema de aplicação  
de carga cíclica para soldadura por  
difusão sob pressão





Universidade do Minho  
Escola de Engenharia

Ricardo Jorge Costa Portugal

Projeto de um sistema de aplicação  
de carga cíclica para soldadura por  
difusão sob pressão

Dissertação de Mestrado  
Engenharia Mecatrónica

Trabalho efetuado sob a orientação do  
Professor Doutor Eurico Seabra  
Professor Doutor Luís Ferreira Silva

## DECLARAÇÃO

Nome: Ricardo Jorge Costa Portugal

Correio electrónico: ricardojcpportugalotmail.com

Tel./Tlm.: 917878826

Número do Bilhete de Identidade: 13759554

Título da dissertação:

Projeto de um sistema de aplicação de carga cíclica para soldadura por difusão sob pressão

Ano de conclusão: 2014

Orientador(es): Professor Doutor Eurico Augusto Rodrigues Seabra

Professor Doutor Luís Fernando Sousa Ferreira Silva

Designação do Mestrado:

Ciclo de Estudos Conducente ao Grau de Mestre em Engenharia

Área de Especialização: Mecatrónica

Escola: Engenharia

Departamento: Mecânica

1. É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO INTEGRAL DESTA DISSERTAÇÃO APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.
2. É AUTORIZADA A REPRODUÇÃO PARCIAL DESTA DISSERTAÇÃO (indicar, caso tal seja necessário, nº máximo de páginas, ilustrações, gráficos, etc.), APENAS PARA EFEITOS DE INVESTIGAÇÃO, MEDIANTE DECLARAÇÃO ESCRITA DO INTERESSADO, QUE A TAL SE COMPROMETE.
3. De acordo com a legislação em vigor, não é permitida a reprodução de qualquer parte desta dissertação

Guimarães, 05/12/2014

Assinatura: \_\_\_\_\_

**Dedicado a minha família**



## **AGRADECIMENTOS**

Venho por este meio manifestar os meus sinceros agradecimentos para todos que de certa forma contribuíram para a realização deste trabalho.

Agradeço à Universidade do Minho pela possibilidade de realizar este trabalho, bem como ter facultado os meios necessários para a sua conclusão.

Ao Vítor Neto, funcionário das oficinas de formação e apoio do departamento de engenharia mecânica pela ajuda prestada e pelos conhecimentos transmitidos.

Ao diretor do curso de Engenharia Mecatrónica, Professor Doutor António Monteiro, pela disponibilidade, ajuda e incentivo demonstrado ao longo de todo o meu percurso académico.

Ao meu amigo Christoph de Sousa pela ajuda em qualquer momento.

Um Agradecimento especial aos Professores Doutores Eurico Augusto Rodrigues Seabra e Luís Fernando Sousa Ferreira Silva, por serem os meus orientadores e sem os quais não teria conseguido chegar à conclusão deste trabalho. Que sempre me incentivaram e estavam sempre disponíveis para qualquer dúvida e esclarecimento. Aos quais demonstro a minha enorme gratidão, que foram meus professores e orientadores mas acima de tudo grandes amigos.

*Ricardo Portugal*



## RESUMO

Com a elaboração deste trabalho pretende-se dar continuidade ao desenvolvimento de um equipamento que através da aplicação de forças cíclicas permite obter juntas de elevada resistência mecânica. Inicialmente o que se pretendia era construir um forno de soldadura em que fosse possível realizar este tipo de juntas usando o processo de Soldadura por difusão sob pressão com uma aplicação cargas cíclicas entre 70 N a 15000 N numa gama de frequências de 0.5 a 5 Hz. Após a seleção de alguns componentes, nomeadamente os que fazem parte do sistema de aplicação de carga (atuador e um regulador electropneumático) e do sistema de controlo e aquisição de dados (célula de carga e placa de aquisição de dados), verificou-se que não era possível obter o intervalo de carga cíclica bem como a gama de frequência pretendida. Deste modo com a realização desta dissertação pretende-se fazer uma melhoria do sistema atual em duas partes principais, nomeadamente, na melhoria da segurança na aplicação da carga, visto que a aplicação de pressão no atuador originava oscilações consideráveis e por outro lado, melhorar a interface com o utilizador, ou seja, atualizar o atual programa de controlo do sistema realizado na plataforma *LabVIEW®*. Após a realização de uns ensaios tipo verificaram-se algumas limitações do sistema, onde não eram atingidos os limites inicialmente propostos, nomeadamente a amplitude e a frequência. Assim, com este novo trabalho pretende-se determinar os limites de aplicação de carga cíclica em termos de amplitude e frequência, para os equipamentos que compõem o sistema de aplicação de carga.



## **ABSTRACT**

With the development of this work we intend to continue the development of a device that by applying cyclic forces allows for high strength joints. Initially, the objective was to build an oven in which welding was possible to perform this type of joint using the welding process Pressuring Diffusion Welding with a cyclic load application between 70 N and 15000 N in a frequency range of 0.5 to 5 Hz. after selection of some components, in particular those forming part of the loading (and actuator electropneumatic regulator) and control and data acquisition (and load cell data acquisition board) system, it was found that was not possible to obtain the range of cyclic loading and the required frequency range. Thus with the embodiment of this thesis it is intended to present an improved system of two main parts, namely, the improvement of security in the application of the load, since the pressure applied to an actuator originated fluctuated considerably and on the other hand, to improve user interface, or upgrade the current system control program carried out in LabVIEW® platform. After conducting some tests like there were some limitations of the system, where the limits were not met initially proposed, namely the amplitude and frequency. So with this new work is intended to determine the limits of application of cyclic loading in terms of amplitude and frequency, for equipment comprising the system load application.



## ÍNDICE

Agradecimentos.....	v
Resumo.....	vii
Abstract.....	ix
Índice.....	xi
Índice de Figuras.....	xv
Índice de Tabelas.....	xix
1 Introdução.....	1
1.1 Enquadramento.....	1
1.2 Objetivos.....	2
1.3 Organização da dissertação.....	2
2 Revisão bibliográfica.....	5
2.1 Soldadura por difusão sob pressão e Soldadura por Difusão.....	5
2.2 Processamento das Juntas.....	6
2.3 Parâmetros do processo.....	8
2.3.1 Temperatura.....	9
2.3.2 Tempo de Soldadura.....	9
2.3.3 Pressão.....	9

---

2.3.4	Atmosfera da câmara de soldadura.....	10
2.4	Materiais.....	10
2.5	Preparação de superfícies.....	11
2.5.1	Rugosidades.....	11
2.5.2	Óxidos.....	12
2.6	Aplicações.....	12
2.7	Vantagens e desvantagens.....	13
3	Projeto existente de um forno de soldadura por difusão sob pressão.....	15
3.1	Desenvolvimento da estrutura.....	15
3.2	Funcionamento.....	16
3.3	Sistema de aplicação de carga.....	18
3.4	Sistema de controlo e aquisição de dados.....	20
3.4.1	Condicionamento de sinal.....	21
3.4.2	Configuração do Condicionador.....	22
3.4.3	Calibração da célula de carga.....	25
3.5	Esquema de ligações.....	27
3.6	<i>Software</i> .....	28
3.6.1	Painel frontal.....	29
3.6.2	Diagramas de blocos.....	29
4	<i>Upgrade</i> do projeto existente.....	35
4.1	Desenvolvimento dos apoios.....	36
4.2	<i>Upgrade</i> do <i>Software</i> .....	38

---

4.2.1	Painel Frontal .....	38
4.2.2	Diagrama de blocos.....	41
5	Análise e discussão de resultados.....	51
5.1	Ensaio .....	52
5.2	Influência da frequência .....	57
5.3	Influência do <i>duty cycle</i> .....	61
5.4	Inércia do sistema .....	63
5.5	Influência da altura.....	65
6	Conclusões e recomendações futuras .....	67
6.1	Sumário dos desenvolvimentos.....	67
6.2	Recomendações futuras .....	69
	Bibliografia.....	71
	Anexos .....	73
	Anexo A – Catálogo da Festo .....	75
	Anexo B – Catálogo da SMC .....	81
	Anexo C – Condicionador de sinal.....	85
	Anexo D – Calibração da célula de carga .....	87
	Anexo E - Tabela geral de validação de ensaios .....	89
	Anexo F - Gráficos de frequências máximas.....	115
	Anexo G - Condições ideais para frequência fixa .....	121
	Anexo H – Manual de utilização .....	137
	Anexo I – Calibração de valores .....	139

Anexo J – Desenhos técnicos..... 143

## ÍNDICE DE FIGURAS

Figura. 2.1- Elaboração de uma junta. a) Contacto inicial limitado a algumas microsaliências; b) Aumento da área de contato; c) Eliminação da maioria dos poros e migração da fronteira de grão da interface; d) Fronteira de grão da interface é indistinguível (Seabra et al, 2009). .....	6
Figura. 2.2- Processo de Sinterização; a, b) eliminação dos poros; c, d) aumento dos grãos.....	8
Figura. 2.3- Limitação da área de contacto entre duas superfícies (Corporation, 2009) .....	11
Figura. 3.1-Estrutura existente. ....	16
Figura. 3.2- Estrutura com sistema de aplicação de carga, célula de carga e regulador electropneumático. 1-Controlador eletropneumático; 2-Atuador de membrana; 3-Célula de Carga .....	17
Figura. 3.3- Aquitetura do sistema de aquisição e controlo. ....	18
Figura. 3.4- Atuador de membrana marca FESTO.....	18
Figura. 3.5- Suportes para definir altura do atuador de membrana .....	19
Figura. 3.6- Regulador eletropneumático .....	19
Figura. 3.7 – Sinal gerado.....	20
Figura. 3.8- Ponte de <i>Wheatstone</i> .....	21
Figura. 3.9- Condicionador de sinal da marca Interface modelo SGA (Anexo C) .....	22
Figura. 3.10- <i>Setting-Switch</i> .....	22
Figura. 3.11- Tabela de configurações de SW1 .....	23
Figura. 3.12- Tabela de configurações de SW3 .....	24

Figura. 3.13- Tabela de configurações de SW4 .....	25
Figura. 3.14- Gráfico de calibração da célula de carga.....	26
Figura. 3.15- Esquema de ligações de condicionador de sinal.....	27
Figura. 3.16- <i>Pinouts</i> da placa de aquisição .....	28
Figura. 3.17- Ligações dos equipamentos; a) Fonte de alimentação, b) Terminal de ligação à placa de aquisição de dados, c) Condicionador de sinal. ....	28
Figura. 3.18- Painel Frontal.....	29
Figura. 3.19- Diagrama de blocos .....	30
Figura. 3.20- Variáveis de entrada: a) Configuração de gerador de ondas. b) Configuração de canal de aquisição de dados.....	31
Figura. 3.21- Ciclo.....	33
Figura. 3.22- Gravar dados .....	33
Figura. 4.9- <i>Offset</i> .....	43
Figura. 4.10- Configuração de canais: a) Gerador de sinal; b) Aquisição de sinal.....	45
Figura. 4.11- Condições lógicas de ciclo interno. ....	46
Figura. 4.12-Canais de aquisição: a) Calibração da célula de carga; b) Sinal de tensão enviado para o regulador; c) Conversor de pressão. ....	48
Figura. 4.13- Gravar dados Automático .....	48
Figura. 4.14- Identificação de dados.....	49
Figura. 4.15-Ciclo de esvaziamento.....	49
Figura. 5.1-Ensaio a [2000-6000]N; Frequência de teste 0,6 Hz; 110 mm; 50% <i>Duty cycle</i> .....	53
Figura. 5.2-Ensaio a [2000-14000]N; Frequência de teste 0,3 Hz; 80 mm; 80% <i>Duty cycle</i> .....	54
Figura. 5.3-Ensaio a [5000-10000]N; Frequência de teste 0,3 Hz; 90 mm; 30% <i>Duty cycle</i> .....	55

---

Figura. 5.4-Ensaio a [1000-5000]N; Frequência de teste 0,3 Hz; 90 mm; 80% <i>Duty cycle</i> .....	56
Figura. 5.5-Ensaio a [5000-10000]N; Frequência de teste 0,8 Hz; 90 mm; 50% <i>Duty cycle</i> .....	57
Figura. 5.6-Influência da frequência em ensaio a [1000-5000]N; 90 mm; 60% <i>Duty cycle</i> .....	58
Figura. 5.7-Condições ideais para 1Hz.....	59
Figura. 5.8-Variação da frequência com a amplitude para várias alturas (Anexo F).....	60
Figura. 5.9-Influência do aumento do <i>duty cycle</i> [1000-5000]N; Frequência de teste 0,6 Hz; 90 mm.....	61
Figura. 5.10- Influência do aumento do <i>duty cycle</i> [3000-14000]N; Frequência de teste 0,4 Hz; 80 mm.....	62
Figura. 5.11- Influência da inércia no sistema para carga máxima.....	63
Figura. 5.12- Influência da inércia no sistema para carga mínima.....	64



## ÍNDICE DE TABELAS

Tabela.3.1- Ensaio de calibração.....	25
Tabela 4.2- Tabela de conversão de valores. ....	47
Tabela 5.1- Estatísticas de repetições.....	59
Tabela 5.2- Estatísticas de repetições.....	63



# 1 INTRODUÇÃO

Neste primeiro capítulo é feita a apresentação do trabalho realizado, inicia-se com o seu enquadramento para realizar uma abordagem geral do tema bem como do assunto propriamente dito. São também apresentados os objetivos do trabalho, assim como a sua organização ao longo da escrita da tese de dissertação.

## 1.1 Enquadramento

A produção de veículos leves é alvo de interesse em muitas áreas, principalmente na aeronáutica e a aeroespacial, portanto a produção de veículos leves é sinónimo de menores consumos. Assim com o seu desenvolvimento a poluição atmosférica sofrerá uma diminuição no nível de emissões de gases poluentes para a atmosfera devido à implementação de novos materiais para a produção de veículos mais leves bem como na utilização de materiais dissimilares para aumentar a temperatura de operação dos Motores (William D.Callister, 2006). Com esta intenção muitas organizações e empresas têm investido e contribuído para o desenvolvimento de novas formas de utilização de materiais mais leves e que sejam suficientemente resistentes. Por vezes para ter materiais com uma elevada resistência mecânica e boa resistência térmica é necessário utilizar a combinação de dois materiais distintos (Seabra et al, 2009). Portanto para utilizar este tipo de metais, é necessário uni-los como referido anteriormente, podendo estes ser similares (materiais idênticos entre si) ou dissimilares (materiais com propriedades diferentes). Surge assim a soldadura por difusão que permite conceber a sua união. A soldadura por difusão é um processo de união que diferente das soldaduras convencionais, não utiliza metal de adição e o processo de união é conduzido no estado sólido, ou seja não há fusão dos materiais a unir. Na conceção das juntas é aplicada uma carga contínua nos materiais a unir, no entanto inferior às que provocariam deformações plásticas macroscópicas nos materiais de base. É necessário também haver uma fonte de calor para aumentar a temperatura de ligação dos materiais entre 50 a 80% do seu ponto de fusão. No entanto para que esta ligação se efetue é necessário que

todo o processo esteja envolvente numa atmosfera inerte (Mahoney, M. W. , Bampton, C.C., 1993).

## 1.2 Objetivos

No âmbito de um projeto de investigação no Centro de Tecnologias Mecânicas e de Materiais (CT2M) da Universidade do Minho pretende-se desenvolver um Forno de vazio para soldadura por difusão sob pressão para o processamento de juntas transientes de elevado desempenho. Este processo de soldadura por difusão sob pressão é bastante similar ao processo de Soldadura por Difusão, cuja principal diferença é na aplicação da carga, em vez de ser contínua a carga a aplicar varia sinusoidalmente ao longo do tempo. Estes dois tipos de soldaduras permitem igualmente a criação de juntas com elevada resistência mecânica, mas na soldadura por difusão sob pressão torna-se mais apelativo o fato de promover a rotura superficial de óxidos nos instantes iniciais do processo, levando assim a um menor tempo de estágio.

Este tipo de soldadura não é muito usual devido à sua cadência de produção, uma vez que a sua conceção pode variar desde minutos a horas. Bem como devida às limitações impostas para o tamanho das suas peças, devido às juntas terem de estar envolventes numa atmosfera inerte, portanto para a conceção de juntas maiores significaria ter equipamentos maiores logo um custo elevado para a produção deste tipo de juntas.

## 1.3 Organização da dissertação

Relativamente à estrutura desta dissertação ela está dividida em 5 capítulos. No primeiro é feito o enquadramento da dissertação, uma apresentação dos objetivos propostos e uma descrição da forma como esta está organizada.

O segundo capítulo contém a revisão bibliográfica sobre o tema abordado. Neste capítulo são abordados os conceitos de Soldadura por difusão sob pressão e Difusão, bem como o seu processamento, aplicações e vantagens.

No terceiro capítulo é descrito todo o sistema de aplicação de carga existente, desde a estrutura desenvolvida, aos equipamentos presentes bem como o *software* de aquisição, tratamento e de controlo, bem como todo o seu funcionamento.

No quarto capítulo são abordadas e descritas as melhorias feitas no sistema existente. Sendo estas melhorias o desenvolvimento de um novo sistema de apoio para a aplicação de carga, e acima de tudo o *upgrade* do *software* existente, que permite implementar novas funcionalidades ao sistema.

Por fim no quinto e sexto capítulo, são apresentados e discutidos os ensaios realizados, e estudadas todas as suas variáveis. É realizado um estudo com a finalidade de determinar todos os seus limites operacionais que originem um bom funcionamento do sistema.



## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Neste capítulo será apresentada toda a informação recolhida sobre o tema da dissertação, assim como mencionados as suas principais características, processos e finalidades.

### 2.1 Soldadura por difusão sob pressão e Soldadura por Difusão

Embora a soldadura por difusão sob pressão seja um ramo pouco estudada, a metodologia da Soldadura por Difusão é conhecida a mais de mil anos, tendo despertado especial interesse nos últimos tempos. Este tipo de soldadura, ao contrário dos métodos mais tradicionais em que na soldadura por fusão aparecem fissurações devido à solidificação do material de base, bem como o aparecimento de tensões residuais devido ao aquecimento extremo do metal, oferece uma solução para os problemas das juntas que têm aparecido. Como o caso da redução da sensibilidade à corrosão (ex. titânio e zircónio), melhoria da tenacidade à fratura (ex. Titânio), melhoria das juntas entre materiais dissimilares (ex. entre metal-metal e metal não metal) e o fabrico de formas complexas (Myothitsan, 2012), (Mahoney, M. W. , Bampton, C.C., 1993).

A soldadura por difusão sob pressão e a soldadura por Difusão são no entanto dois métodos de união de materiais idênticos, porém diferem no modo de aplicação da carga. Nos ensaios de soldadura por Difusão é aplicada uma carga constante durante todo o processo, e na soldadura difusão sob pressão o modo de carga a aplicar varia sinusoidalmente durante o seu processo para uma frequência estipulada, o que possibilita uma redução do tempo de estágio devido à rutura da película superficial de óxido nos instantes iniciais do processo. Estes dois tipos de soldadura são processos de união conduzidos no estado sólido, onde não há metal de adição nem fusão do material de base. Por sua vez para a conceção das juntas é requerida uma combinação de temperatura e de deformação plástica microscópica para que haja uma alteração da microestrutura dos materiais de base, a fim de produzir juntas de elevada resistência entre os dois materiais (Seabra et al, 2009). De modo a haver uma união perfeita

entre os materiais é necessária uma limpeza nas superfícies de contato dos dois componentes para que as impurezas não interfiram no processo de soldadura (Almeida, 2008).

## 2.2 Processamento das Juntas

Como o próprio nome indica a soldadura por difusão sob pressão e a soldadura por Difusão são fenômenos de transporte de matéria através do movimento atômico, no qual é formado com o contato entre duas faces, (superfícies devidamente preparadas e limpas), onde é exercida uma determinada pressão, (no entanto deverá ser inferior à que provocaria a deformação plástica do material de base), a uma dada temperatura, (entre 50 a 80% do ponto de fusão do material de base), e durante um intervalo de tempo numa câmara de vácuo ou numa atmosfera de gás inerte (Almeida, 2008). No momento de aplicação de pressão e calor ocorre a deformação microscópica dos materiais de base, as camadas de átomos que compõem a estrutura cristalina do metal movimentam-se em várias direções ocupando diferentes lugares promovendo assim a ligação perfeita de ambas as partes. Este processo de ligação dos materiais de base pode ser descrito em três fases como é possível observar na figura. 2.1 (Mahoney, M. W. , Bampton, C.C., 1993):

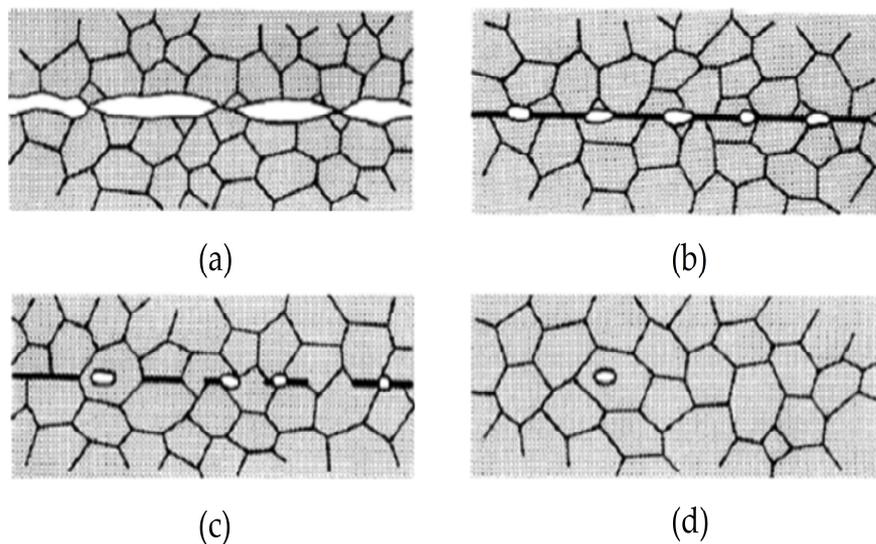


Figura. 2.1- Elaboração de uma junta. a) Contacto inicial limitado a algumas microsaliências; b) Aumento da área de contato; c) Eliminação da maioria dos poros e migração da fronteira de grão da interface; d) Fronteira de grão da interface é indistinguível (Seabra et al, 2009).

As três fases que representam o processo de formação das juntas são:

- Fase I-Deformação das Microsaliências.
- Fase II-Transporte de massa controlado por Difusão.
- Fase III-Migração da Interface.

Fase I: Apesar do bom acabamento superficial e da sua limpeza uma superfície nunca vai ter uma área de contato completa devido às rugosidades dos materiais (Figura. 2.1.(a)). Apesar do bom acabamento superficial do material a percentagem da área de contacto entre os materiais é muito reduzida, este contato está ainda limitado a algumas microsaliências uma vez que se encontra à temperatura ambiente e a pressão exercida é inferior à que provocaria a sua deformação plástica. Este tipo de limitações acentua-se consoante o aumento do grau de dureza dos materiais. Com o aumento da temperatura e da pressão o contato entre as superfícies vai aumentar devido a deformação das microsaliências originada pelo aumento de energia cinética dos átomos o que lhes permite movimentarem-se ao longo do material preenchendo os espaços vazios entre as duas superfícies dos materiais (Mahoney, M. W. , Bampton, C.C., 1993). Com o decorrer do tempo a área de contato aumenta e as tensões que atuam na superfície das microsaliências vão diminuindo uma vez que nesta fase final as deformações por fluência deixam de ter significado. Por fim com o aumento da área de contato surge uma superfície plana entre os materiais, onde somente restam alguns poros que ficaram entre as superfícies que não foram removidos completamente através do processo de deformação (Seabra et al, 2009).

Fase II: É nesta fase que ocorre a sinterização, ou seja a eliminação da maior parte dos poros que se encontram entre as superfícies. Para que o processo de sinterização ocorra a temperatura deve ser cerca de 80% da temperatura do material de base, o que permite um contato entre o sistema de partículas. Com o tempo a área entre as partículas aumenta e os poros começam a ser suavizados e os poros que se encontram nos contornos do grão possibilitam a densificação pois como alguns grãos estão a aumentar de tamanho, estes pressionam os poros o que faz com que sejam eliminados por difusão em contorno de grão (António Valadão Cardoso, 2005).

Este processo de eliminação de poros é apresentado na figura 2.2, através da sucessão de imagens que representam o processo de sinterização. Existiam inicialmente poros entre as fronteiras de grão, mas devido à movimentação e aumento dos grãos, os poros começaram a ser comprimidos pelas duas forças o que levou à eliminação da maioria dos poros. No entanto

neste processo só são eliminados a maioria dos poros que estiverem nas fronteiras de grão, em que os poros que ficam são os que se encontram no núcleo do grão (Figuras 2.2 b) e d)).

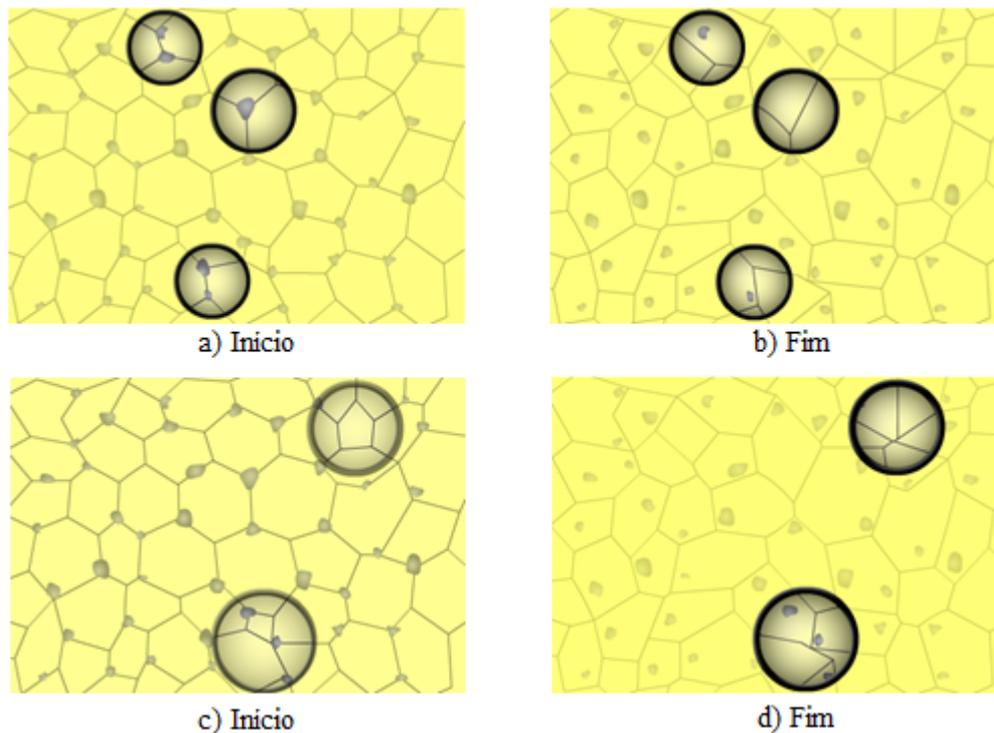


Figura. 2.2- Processo de Sinterização; a, b) eliminação dos poros; c, d) aumento dos grãos.

Fase III: Após a segunda fase a maior parte dos poros foi eliminada e muitos diminuíram de tamanho devido ao processo de sinterização. Com o aumento do grão devido ao movimento dos contornos a influência no ancoramento das fronteiras vai diminuir, o que permite a migração das fronteiras de grão. A migração dos grãos que inicialmente se podia observar como uma linha reta a fazer a distinção entre as duas superfícies, torna-se uma linha distorcida com penetrações em ambos os materiais (Seabra et al, 2009).

### 2.3 Parâmetros do processo

Para a realização de uma boa junta, são necessários ter determinadas considerações, como já referidas anteriormente, sendo as mais importantes a temperatura, a pressão exercida, o tempo de estágio, o acabamento superficial das superfícies, bem como a atmosfera existente na câmara de vácuo (Almeida, 2008).

### 2.3.1 Temperatura

A temperatura é dos parâmetros do processo de soldadura no estado sólido mais importante, uma vez que controla todos os fenómenos envolvidos na formação da junta. Para este tipo de processos com a variação da temperatura é possível controlar a taxa de difusão da junta, o deslocamento dos átomos a nível estrutural da interface, a taxa de remoção de contaminantes e a taxa de eliminação de falhas na junta. No caso da utilização de materiais com junta dissimilar é com a temperatura que se controla o tempo acima do qual se iniciará a formação da junta. (Camargo, 1990). A temperatura geralmente requerida para este tipo de processos é cerca de 50 a 80% do ponto de fusão do material de base. (Mahoney, M. W. , Bampton, C.C., 1993)

### 2.3.2 Tempo de Soldadura

O tempo necessário para a obtenção de uma junta resistente e de boa qualidade deve ser, na maioria dos casos, o mínimo possível tendo em consideração as características dos materiais e os custos económicos envolvidos. O tempo de estágio deve ser suficiente para que seja formado um contato íntimo entre os materiais. A duração da aplicação da temperatura deverá apenas ser a necessária para que ocorra uma soldadura dos componentes.

Consoante o tipo de soldadura e materiais a unir o tempo de soldadura pode variar de segundos a horas de estágio. Portanto o tempo de soldadura é dependente de outras variáveis, que em geral tem uma relação direta com as outras variáveis como a temperatura e a pressão aplicada, onde com o aumento da temperatura e da pressão aplicadas o tempo de estágio tem tendência a diminuir.

Para as várias situações, se o tempo de aplicação de pressão e temperatura for reduzido pode não haver união entre os componentes, ou juntas com falhas na interface, em contrapartida o mesmo acontece para tempos de duração excessivos podendo também haver uma alteração da composição do material de base e acumulação de tensões residuais. (Almeida, 2008)

### 2.3.3 Pressão

É com a aplicação de pressão nos instantes iniciais que é feito o contacto entre as superfícies à temperatura selecionada. A aplicação de pressão deve ser de tal grandeza que provoque uma deformação nos materiais inferiores a 5% mas que provoque um contato íntimo entre as

superfícies, deformando a rugosidade da superfície para que todos os vazios da zona a soldar estejam preenchidos (Almeida, 2008). A aplicação de pressão tem também uma outra finalidade, a remoção da camada de óxidos presente nas superfícies dos materiais (Seabra et al, 2009).

### **2.3.4 Atmosfera da câmara de soldadura**

A aplicação da pressão ajuda no processo de remoção da camada de óxidos existente na superfície, contudo é necessário proteger o ambiente envolvente ao processo para que não haja novamente uma oxidação das superfícies ao entrar em contacto com os gases presentes no meio ambiente (Camargo, 1990). Para tal é utilizada uma atmosfera de proteção de alto vácuo, entre os  $10^{-1}$  e os  $10^{-3}$  Pa, onde podem ser por vezes utilizados alguns tipos diferentes de gases inertes, com o argon seco, hélio ou vários gases misturados) (Almeida, 2008).

## **2.4 Materiais**

Os processos de Soldadura por Difusão e Soldadura por difusão sob pressão permitem uma variedade de combinações de matérias.

### **Materiais similares**

Como os dois materiais a unir são os mesmos, a temperatura, a pressão e o tempo de soldadura só vão depender das características dos dois matérias assim como da sua preparação superficial.

### **Materiais dissimilares**

Este tipo de processo permite a união de materiais com características distintas como é o caso da união entre ligas de alumínio e magnésio, titânio e gamas de titânio e alumínio entre outros. No entanto, deve ser tida em consideração que a temperatura de soldadura escolhida deverá ser relacionada com o material com menor ponto de fusão.

### **Materiais similares com camada intermédia**

Entre as superfícies a unir é colocada uma camada intermédia, em geral de um material mais dúctil, de forma a acelerar a difusão dos materiais facilitando assim o as micro-deformações originando um contacto mais perfeito.

## 2.5 Preparação de superfícies

Para que seja realizada uma junta com elevada resistência e sem falhas é necessário ter alguns cuidados com os materiais, nomeadamente a preparação das superfícies antes de estas serem utilizadas (Mahoney, M. W. & Bampton, C.C., 1993).

Alguns cuidados a ter antes de iniciar o processo de soldadura seriam:

- Maquinagem das superfícies
- Polimento das superfícies para diminuir a rugosidade
- Limpeza das superfícies de união por decapagem química removendo gorduras, óleos, óxidos e impurezas encontradas nas superfícies

### 2.5.1 Rugosidades

Como demonstra a figura 2.3 um material apresenta sempre certo nível de rugosidade, apesar dos vários processos que sejam feitos vai sempre existir. No entanto há formas de as minimizar de forma a obter um maior contacto quando a superfície dos dois materiais estiverem em contacto.

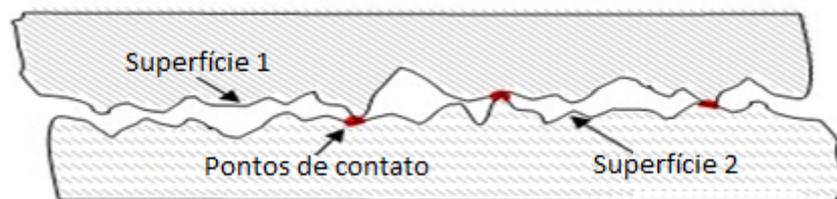


Figura. 2.3- Limitação da área de contacto entre duas superfícies (Corporation, 2009)

A rugosidade é um elemento fundamental para a elaboração de uma junta com elevada qualidade e resistência mecânica. É uma variável de igual significância como a temperatura e a pressão, apesar de não ter uma influência direta com este tipo de variáveis tem influência na sua escolha. Com a diminuição da rugosidade das superfícies é possível aumentar a força de ligação, facilitando a difusão dos materiais e contribuindo para a constituição de juntas com maior resistência (Al-Janabi et al, 2009). Com a redução das rugosidades para uma determinada qualidade da solda o tempo de soldadura pode ser reduzido significativamente (Andrzejewski et al, 1993). Alguns autores afirmam ainda de modo a obter uma junta de alta qualidade, o ideal seria a rugosidade da superfície ser do tamanho de grão do material de base (Higashi , Kenji, 2003).

## 2.5.2 Óxidos

Uma outra limitação para a obtenção de juntas com elevada resistência é a presença da camada superficial de óxidos que se encontram na maioria dos materiais. Exemplo disso são os materiais à base de ligas de alumínio, que reagem com o oxigénio presente na atmosfera e originando assim os óxidos de alumínio ( $Al_2O_3$ ). Assim, ligas de alumínio e outros metais que apresentem estas características de oxidação são particularmente difíceis de unir, sendo que são fisicamente muito aderentes e quimicamente estáveis.

A figura 2.4 representa exatamente as limitações entre o contato entre duas superfícies, a rugosidade, já mencionada anteriormente, e a camada de filme de óxido presente nestes materiais.

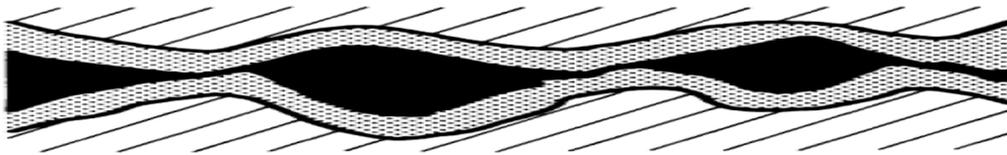


Figura. 2.4- Camada de filme de óxido existente na superfície de um material.

No entanto uma das formas de remover a camada superficial, baseia-se na rutura física do filme de óxido com a deformação plástica durante a ligação, provocada pela aplicação de pressão no processo de soldadura por difusão como já referido anteriormente (Shirzadi, H. Assadi, Wallach, 2000).

## 2.6 Aplicações

Devido à possibilidade de efetuar a união entre uma variedade de materiais dissimilares, este tipo de soldadura tem uma elevada variedade de aplicações, desde a indústria aeronáutica, aeroespacial, nuclear, automóvel, entre outros...

A indústria aeroespacial utiliza este tipo de processo de soldadura por difusão na utilização de ligas de titânio e alumínio para redução do peso, nomeadamente para a construção de algumas peças estruturais e fuselagem. Existem outras situações como o caso da Rolls-Royce que produz pás em titânio para os ventiladores utilizados em alguns dos seus motores (Patricio F.Mendes, Thomas W.Eagar, 2001).

Na indústria nuclear este tipo de tecnologia é utilizado sobretudo em revestimentos e elementos para o núcleo do reator.

No fabrico de componentes a soldadura por difusão está a ser utilizada como técnica de união de matérias em estruturas tipo sanduíche, exemplo disso são os permutadores de calor e filtros.

## **2.7 Vantagens e desvantagens**

Vantagens na soldadura por difusão:

- Materiais diferentes podem ser soldadas (metais, cerâmicas, grafite, vidro);
- Juntas de elevada qualidade (sem poros, inclusões, distorções, resistentes);
- Sem limitação na espessura peças de trabalho.

Desvantagens na soldadura por difusão:

- Tempo de processo pode ser elevado;
- Baixa produtividade;
- Preparação de superfície muito completa;
- As superfícies de acoplamento devem ser montadas com precisão entre si;
- Custo inicial elevado;
- Área de soldura limitada ao tamanho do dispositivo de Soldadura.



### **3 PROJETO EXISTENTE DE UM FORNO DE SOLDADURA POR DIFUSÃO SOB PRESSÃO**

Com o desenvolvimento deste projeto pretende-se construir um forno de soldadura para o estudo de juntas de elevada resistência mecânica. Para a sua elaboração são necessários vários tipos de sistemas, nomeadamente o sistema de aplicação de carga, sistema de controlo e aquisição de dados, sistema de aplicação de calor, sistema de refrigeração e o sistema de vácuo. Portanto com a elaboração desta dissertação pretende-se dar continuidade ao desenvolvimento de uma estrutura de suporte para todo o conjunto destes equipamentos, bem como escolher os componentes para os sistemas mencionados. A construção da estrutura e a escolha dos componentes tem como objetivo a realização de ensaios, onde seja possível fazer a aplicação de carga com uma variação de 70 a 15000 N com uma frequência de 0,5 a 5 Hz.

#### **3.1 Desenvolvimento da estrutura**

Existia inicialmente no Departamento de Engenharia Mecânica uma estrutura que era utilizada para promover a Soldadura por Difusão tendo sido utilizada como base de construção para a nova estrutura. Esta nova estrutura, apresentada na figura 3.1, foi desenvolvida anteriormente por uma aluna ao abrigo de uma tese de dissertação do Mestrado Integrado em Engenharia Mecânica para corresponder a alguns requisitos, tais como:

- A ergonomia (relação homem-máquina);
- Resistente a variações de carga (para uma carga máxima de 15000 N);
- Robusta;
- Compacta;
- Segura:



Figura. 3.1-Estrutura existente.

Com um peso cerca de 165 kg e com um tamanho de 220x61x45 é apresentado como demonstra a figura acima a estrutura desenvolvida para a elaboração do forno, onde foram utilizados alguns materiais existentes do forno anterior. Foram também usados alguns perfis em U e I e algumas cantoneiras como reforço da estrutura.

### 3.2 Funcionamento

Para testar o equipamento foi instalado o sistema de controlo e aquisição de dados e o sistema de aplicação de carga. O sistema de aplicação de carga consiste na aplicação de carga num tubo vertical por meio de um atuador de membrana pneumático controlado por um regulador electropneumático. Por sua vez esta aplicação de carga é medida por uma célula de carga colocada no outro extremo do tubo como demonstra a figura. 3.2. O sistema de controlo e aquisição de dados consiste no controlo de todo o sistema através de uma placa de aquisição de dados (NI PCI 6251) da *National Instruments®*, com um *software* de programação (*LabVIEW®*) onde é possível fazer o controlo das variáveis de todo o sistema, sendo elas:

- Tempo de estágio;
- Carga Mínima;
- Carga Máxima;
- Frequência.

A figura 3.2 ilustra a estrutura com os diferentes equipamentos instalados.



Figura. 3.2- Estrutura com sistema de aplicação de carga, célula de carga e regulador electropneumático.  
1-Controlador eletropneumático; 2-Atuador de membrana; 3-Célula de Carga

O funcionamento do conjunto, sistema de aplicação de carga e o sistema de controlo e aquisição de dados, pode ser representado por um diagrama de blocos (figura. 3.3), onde é possível visualizar de forma esquematizada a arquitetura do funcionamento dos dois sistemas em conjunto. O início do ensaio é realizado pela escolha e inserção das variáveis por parte do utilizador para a gama de valores definida inicialmente, para uma carga de 70-15000 N e uma frequência de 0,5 a 5 Hz e não havendo limites para as restantes variáveis. Para a realização dos ensaios é utilizado um programa desenvolvido com um *software* apropriado (*LabVIEW®*) que permite fazer todo o seu controlo. Com as variáveis escolhidas pelo utilizador este programa, através da placa de aquisição, permite gerar um sinal elétrico correspondente ao sinal de controlo do regulador electropneumático. Conforme o sinal elétrico, é feita a regulação da válvula que se encontra no interior do regulador. Com o controlo da válvula proporcional do regulador é possível controlar a pressão exercida no atuador pneumático, que por sua vez pode ser determinada através da célula de carga que se encontra no outro extremo. Através do uso do programa desenvolvido com o *software LabVIEW®* é possível escolher todas as variáveis do sistema, assim como proceder à sua monitorização.

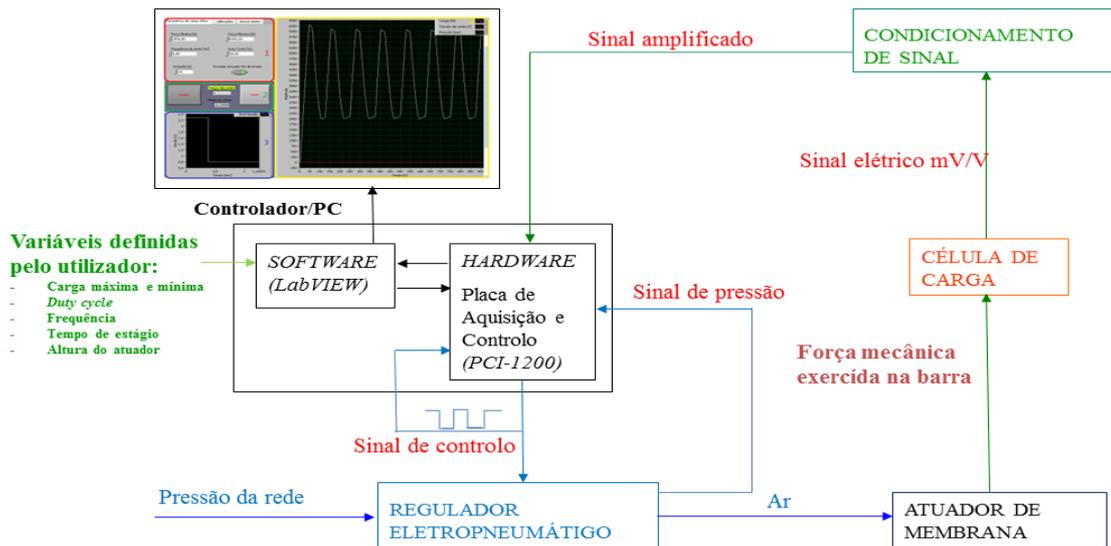


Figura. 3.3- Aquitetura do sistema de aquisição e controle.

### 3.3 Sistema de aplicação de carga

De acordo com os requisitos já referidos anteriormente, é necessária a aplicação de uma variação de carga de 70 a 15000 N com uma frequência de 0,5 a 5 Hz. Após uma análise de mercado para o sistema de aplicação de carga foi escolhido um cilindro de membrana de simples efeito da marca FESTO com uma pressão máxima de 8 bar, e um regulador electropneumático da marca SMC para uma gama de pressões entre 0,005 e 9 bar (ver figura 3.4 e 3.6). Este conjunto corresponde ao sistema de aplicação de carga, escolhido devido à sua fácil utilização e ao seu baixo custo em relação a outros componentes. As suas propriedades podem ser visualizadas nos seus devidos catálogos que se encontram nos Anexos A e B.

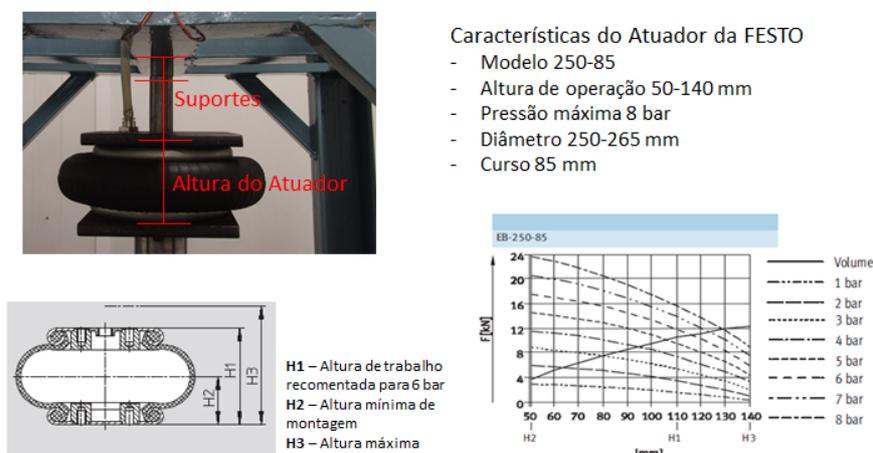


Figura. 3.4- Atuador de membrana marca FESTO

Relativamente ao seu funcionamento, este atuador de membrana pode operar entre diferentes alturas como é possível visualizar na figura 3.4. Como a altura de operação varia de 50 a 140 mm e a estrutura é isostática foi necessário a criação de uns suportes, suportes esses que permitem alterar a altura de operação do atuador de membrana. Com a combinação dos vários suportes, como está representado na figura 3.5, é possível obter as quatro alturas de operação desejadas para a realização dos ensaios.



Figura. 3.5- Suportes para definir altura do atuador de membrana

O controlo da pressão que permite a aplicação de carga através do atuador de membrana é realizado pelo regulador eletropneumático, representado na figura 3.6



**Especificações do Regulador da SMC**

- SMC ITV2050-313CS3-Q
- Caudal de regulação 25 l/s
- Sinal de controlo (input) 0-10 VDC
- Alimentação 24 VDC
- Sinal de controlo (input) 0-10 VDC
- Sinal de pressão (output) 0-5 VDC
- Gama de pressões 0,005 a 9 bar

Figura. 3.6- Regulador eletropneumático

Estes dois equipamentos compõem o sistema de aplicação de carga, o seu funcionamento em conjunto consiste em aplicar uma determinada pressão no atuador de membrana a fim de obter uma variação de carga na célula. Esta pressão é exercida pelo controlo da válvula proporcional que se encontra no regulador eletropneumático, cada nível de tensão aplicado corresponde a uma diferente abertura da válvula proporcional, ou seja para uma variação de 0 a 10 V aplicados no regulador corresponde uma variação de pressão de 0 a 9 bar. Portanto para obter uma variação de carga cíclica é gerado um sinal elétrico com os parâmetros definidos pelo utilizador para cada ensaio (Figura. 3.7) através do programa elaborado em *LabVIEW®*. Em cada instante e para cada diferente nível tensão aplicada ao regulador corresponde uma dada abertura da válvula proporcional e como ao longo do tempo o sinal elétrico tem um comportamento cíclico, a válvula também vai ter o mesmo comportamento o que se reflete numa variação de pressão no atuador também de forma cíclica.

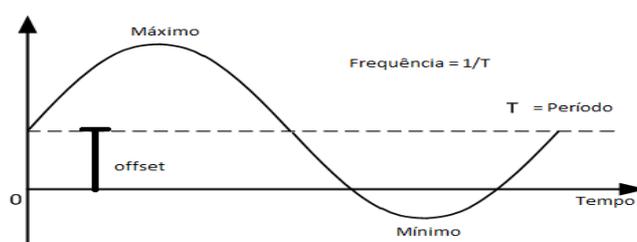


Figura. 3.7 – Sinal gerado

Este sinal elétrico é gerado pelo programa de acordo com as variáveis definidas pelo utilizador, onde o máximo e o mínimo representam a carga máxima e mínima definida para cada ensaio e a frequência o número de ciclos (onde um ciclo é um período) durante um intervalo de tempo. Em relação ao *offset*, esta variável não é definida pelo utilizador é definida internamente pelo programa, que representa um valor de tensão equivalente ao peso que é aplicado na célula de carga antes de ser aplicado qualquer pressão no atuador de membrana. E que por fim este valor é subtraído antes de cada ensaio para quando for aplicado uma pressão e 0 bar seja possível obter uma leitura de 0 N de carga.

### 3.4 Sistema de controlo e aquisição de dados

O sistema de aquisição é composto por uma célula de carga, um amplificador de sinal e a placa de aquisição de dados (NI PCI 6251) da *National Instruments®*. O programa de controlo foi elaborado em *LabVIEW®*, uma ferramenta de programação em blocos em que a programação é

feita através de uma interface gráfica. Este tipo de programa permite fazer o controlo do regulador electropneumático com os parâmetros escolhidos pelo utilizador, nomeadamente a carga máxima e mínima, a frequência e a duração do ensaio, bem como a aquisição do sinal proveniente da célula de carga. Por sua vez para ter uma leitura correta deste sinal foi necessário fazer um condicionamento do sinal elétrico para amplificar o sinal da célula de carga porque as tensões à saída da célula de carga são na ordem dos mV/V. Para amplificar o sinal foi utilizado um condicionador de sinal modelo SGA da marca Interface.

### 3.4.1 Condicionamento de sinal

As células de carga são dispositivos eletromecânicos que medem a deformação ou flexão de um determinado corpo e a transforma em uma saída de tensão. O sinal de saída varia proporcionalmente com a carga aplicada. As células são principalmente constituídas por uma estrutura mecânica à qual sofre deformação quando lhes é aplicada uma força. Um elemento elástico converte essa deformação em um sinal elétrico proporcional à quantidade de força aplicada. Tal variação ocorre com a implementação de uma ponte de *Wheatstone*, que em geral vêm incorporadas com a célula de carga. A ponte de *Wheatstone* (figura 3.6) é um sistema elétrico com quatro resistências em equilíbrio, ao haver uma variação numa das suas resistências provoca o desbalanceamento da ponte, e assim resulta em um sinal elétrico proporcional à carga aplicada após a calibração.

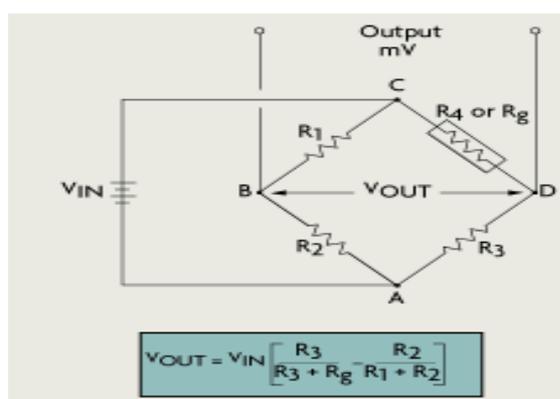


Figura. 3.8- Ponte de *Wheatstone*

De acordo com as especificações da célula selecionada (Anexo D), esta tem uma sensibilidade de 4.32786 mV/V, ou seja quando é alimentada a 10 V vai gerar um sinal à saída de:

$$4,32786 \times 10 = 43.2786 \text{ mV} \quad \text{Eq. (1)}$$

Portanto quando a célula é alimentada com uma tensão DC de 10 V vai gerar 43.2786 mV em fim de escala, para uma carga máxima de 5 klbf (22,24 kN). Como a variação de sinal é mínima é necessário amplificar o sinal de saída para uma faixa de amostragem de 10 V, que representa a faixa de amostragem da placa de aquisição.

Para tal foi utilizado o amplificador de sinal representado na figura. 3.7, em que simplesmente é necessário definir quais os filtros e ganho a utilizar, bem como realizar corretamente o sistema de ligações correspondente.

#### Model SGA Amplifier/Conditioner

- User selectable analog output +/-10V, +/-5V, 0-10V, 0-5V, 0-20mA, 4-20mA
- 110 VAC, 220 VAC OR 18-28 VDC power
- Switch selectable filtering 1 Hz to 5 kHz
- Single channel powers up to 4 transducers
- Selectable full scale input range 0.06 to 30 mV/V
- Switch selectable offset +/-70% FS
- Sealed ABS enclosure
- CE Marked



Figura. 3.9- Condicionador de sinal da marca Interface modelo SGA (Anexo C)

### 3.4.2 Configuração do Condicionador

Como é possível ver na figura 3.8 o condicionador contém vários outputs *switch* que são configurados de acordo com as condições do sinal de entrada, sinais de saída assim como a escolha de filtros e ganho adequado. Foi com estes *switchs* que foi feita toda a configuração do amplificador de sinal. Cada elemento é composto por oito pinos onde dependendo da configuração pretendida é realizada uma combinação de 0 e 1, correspondendo o pino configurado para a parte superior 1, e para a parte inferior 0.

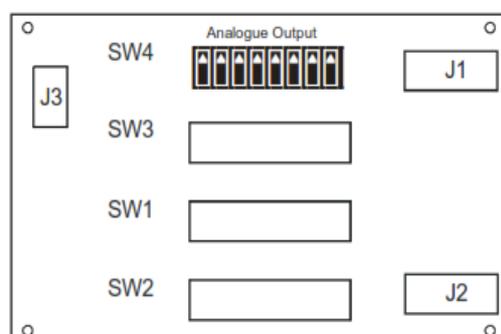


Figura. 3.10- *Setting-Switch*

Este condicionador de sinal contém quatro *switch* (SW1, SW2, SW3, SW4), em que cada um corresponde a uma propriedade de configuração diferente, que serão abordados de seguida.

### SW1 (Ganho)

O *Switch* 1 permite escolher o ganho que pretendemos ter, ou seja, o quanto o sinal de entrada é amplificado. Como podemos verificar nas definições da célula de carga a sua sensibilidade é de 4.32685 mV/V, consultando a figura 3.9 pode-se verificar qual a posição dos pinos para a configuração do ganho.

27	2.49 mV/V	1 2 3 4 5 6 7 8	↑ ↑ ↓ ↑ ↑ ↑ ↑ x
28	2.63 mV/V	1 2 3 4 5 6 7 8	↓ ↑ ↑ ↓ ↓ ↓ ↓ x
31	3.19 mV/V	1 2 3 4 5 6 7 8	↓ ↓ ↑ ↓ ↓ ↓ ↓ x
32	3.35 mV/V	1 2 3 4 5 6 7 8	↑ ↓ ↓ ↑ ↑ ↑ ↑ x
35	3.73 mV/V	1 2 3 4 5 6 7 8	↓ ↑ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ x
36	4.00 mV/V	1 2 3 4 5 6 7 8	↑ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ x
39	4.26 mV/V	1 2 3 4 5 6 7 8	↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ ↓ x
40	4.36 mV/V	1 2 3 4 5 6 7 8	↓ ↑ ↑ ↓ ↑ ↑ ↑ x
43	5.12 mV/V	1 2 3 4 5 6 7 8	↑ ↑ ↓ ↓ ↑ ↑ ↑ x
44	5.34 mV/V	1 2 3 4 5 6 7 8	↓ ↑ ↓ ↓ ↑ ↑ ↑ x

Figura. 3.11- Tabela de configurações de SW1

Pode-se então verificar que existe uma configuração tabelada de 4,36 mV/V, que seria uma solução, uma vez que a célula é de 5 klbf (22,24 kN) e que a rede pneumática só disponibiliza cerca de 6 bar. Após um pequeno teste verificou-se que a configuração de 3,19 mV/V servia perfeitamente e que assim iria aumentar a sua faixa de amostragem, ou seja, aumentando o ganho do sinal e ter uma faixa de amostras completa para toda a gama de pressão disponível. Com isto é possível determinar o ganho do condicionador de sinal, sendo ele:

$$V_{entrada} = \frac{3,19 \text{ mV}}{V} \times 10 \text{ V} = 31,9 \text{ mV}$$

$$Ganho = \frac{V_{saída}}{V_{entrada}} = \frac{10 \text{ V}}{0,0319 \text{ V}} = 313,48 \quad \text{Eq. (2)}$$

### SW2 Zero (*Offset*)

Este condicionador de sinal permite a realização de um *offset* através das configurações dos pinos, mas optou-se por realizar a sua configuração no programa em *LabVIEW®* apenas por questões de facilidade.

### SW3 (filtros)

Para a escolha da configuração do *Switch 3*, foi utilizado um filtro passa baixo de 5 kHz (figura 3.10), simplesmente para filtrar algum ruído que o sinal possa conter. Para seleccionar este tipo de filtro é feita a combinação de pinos presentes na figura 3.10, sendo a combinação 11111100.

SW3	1	2	3	4	5	6	7	8
1Hz	0 ↓	0 ↓	0 ↓	0 ↓	0 ↓	0 ↓	1 ↑	1 ↑
5Hz	1 ↑	0 ↓	0 ↓	0 ↓	0 ↓	1 ↑	1 ↑	1 ↑
10Hz	1 ↑	1 ↑	0 ↓	0 ↓	1 ↑	1 ↑	1 ↑	1 ↑
50Hz	1 ↑	1 ↑	1 ↑	1 ↑	1 ↑	1 ↑	1 ↑	1 ↑
100Hz	0 ↓	0 ↓	0 ↓	0 ↓	0 ↓	0 ↓	0 ↓	0 ↓
500Hz	1 ↑	0 ↓	0 ↓	0 ↓	0 ↓	1 ↑	0 ↓	0 ↓
800Hz	see note**							
1kHz	1 ↑	1 ↑	0 ↓	0 ↓	1 ↑	1 ↑	0 ↓	0 ↓
5kHz	1 ↑	1 ↑	1 ↑	1 ↑	1 ↑	1 ↑	0 ↓	0 ↓

Figura. 3.12- Tabela de configurações de SW3

### SW4 (Configurações de output)

Para as condições de saída do sinal, simplesmente foi escolhido um filtro à entrada do condicionador de sinal, bem como a 8ª configuração ser 1, correspondente à largura de banda da placa de aquisição de dados, 10 V como é apresentado na figura 3.11.

Analogue Output Options - SW4								
SW4	1	2	3	4	5	6	7	8
±10V	0↓	0↓	0↓	X	X	1=Filter	1=No Filter	X
±5V	0↓	1↑	0↓	X	X	1=Filter	1=No Filter	X
0-10V	0↓	1↑	1↑	X	X	1=Filter	1=No Filter	X
0-5V	1↑	1↑	1↑	X	X	1=Filter	1=No Filter	X
0-20mA	X	X	X	0↓	0↓	1=Filter	1=No Filter	X
4-20mA	X	X	X	1↑	1↑	1=Filter	1=No Filter	X
Filter out	X	X	X	X	X	0↓	1↑	X
Filter in	X	X	X	X	X	1↑	0↓	X

Figura. 3.13- Tabela de configurações de SW4

### 3.4.3 Calibração da célula de carga

Após ser feito todo o sistema de ligações bem como o desenvolvimento do programa de controlo em *LabVIEW®* e configurado o amplificador de sinal foi necessário fazer a calibração nomeadamente para a aquisição dos dados provenientes da célula de carga. O sinal gerado pela célula de carga é um sinal elétrico que foi amplificado e de acordo com a variação da carga tem uma variação de 0 a 10 V. Portanto há a necessidade de interpretar o seu significado, para tal foi feita uma calibração da célula de carga em que através de uma equação linear foi possível descrever o comportamento da mesma. Neste caso como a célula de carga vinha com um teste de carga realizado, foram utilizados estes valores para determinar a curva de calibração da célula.

A tabela 3.1 representa o teste de calibração feito pela marca Interface, que simplesmente foi alterada para este caso de estudo, onde foram acrescentados mais três colunas. A coluna de carga em N simplesmente foi a conversão de quilo libras força em Newton onde:

$$1 \text{ k}lbf = 1 \text{ k}lbf \times 9,81 \times 0,453592 \times 1000 \text{ N} \quad \text{Eq. (3)}$$

Em que 9,81 é a aceleração da gravidade e  $0,453592 \times 1000$  é o conversor de unidades para Newton.

Tabela.3.1- Ensaio de calibração

klbf	N	mV/V	mV	V
0	0	0	0	0
1	4449,738	0,86451	8,6451	2,7059163
2	8899,475	1,72973	17,2973	5,4140549
3	13349,21	2,59541	25,9541	8,1236333
4	17798,95	3,46144	34,6144	10,8343072
5	22248,69	4,32786	43,2786	13,5462018

Alimentação a 10 V Ganho de 313

Como já referido anteriormente a célula de carga é alimentada a 10 V, portanto o sinal é multiplicado por 10 o que representa a quarta coluna da tabela anterior. Por fim a última coluna foi simplesmente calculada multiplicando a coluna do sinal alimentado a 10 V por 313 que representa o ganho do amplificador de sinal já calculado anteriormente. É também possível verificar na última linha da tabela para uma carga de 5 kbf um sinal de saída de 13,54 V. Este valor na realidade não é possível medir uma vez que a tensão máxima que a placa de aquisição permite medir é de 10 V, mas como a carga máxima estipulada para estes ensaios foi de 15000 N que corresponde a um sinal gerado inferior a 10 V, sendo assim, é possível concluir que o ganho escolhido anteriormente é o ideal o que permite utilizar toda a sua largura de banda. Portanto com a tabela 3.1 é possível elaborar um gráfico que representa o comportamento da célula de carga quando lhe é aplicada uma determinada pressão (figura 3.12).

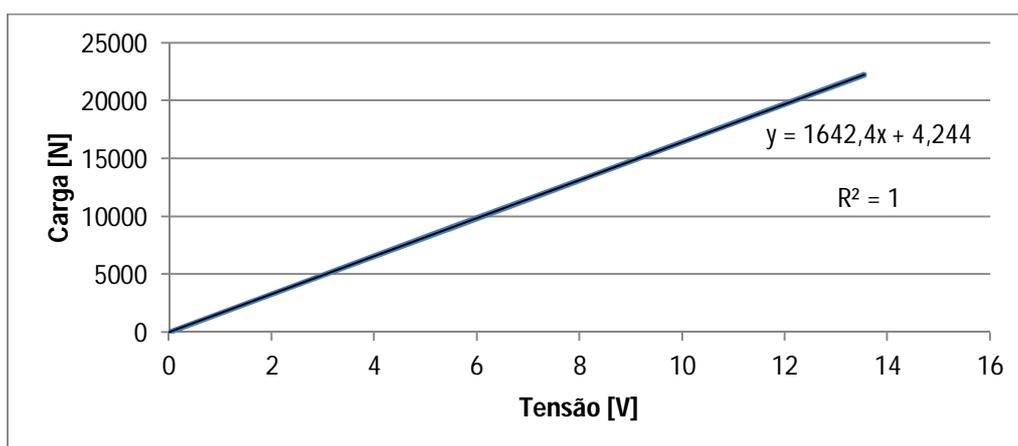


Figura. 3.14- Gráfico de calibração da célula de carga

Através deste gráfico é determinada a linha de tendência e a equação que representa o comportamento da célula de carga quando sujeita a uma determinada carga, sendo ela:

$$y = 1642,4x + 4,244 \quad \text{Eq. (4)}$$

Em que  $x$  é a tensão de saída do sinal amplificado e  $y$  representa a carga em N.

Esta equação define o comportamento da célula de carga, e foi implementada no *software* desenvolvido, permitindo determinar qual a carga que está a ser aplicado a cada instante.

### 3.5 Esquema de ligações

A figura 3.13 esquematiza o sistema de ligações efetuado para ligar o condicionador de sinal, contudo existem diferentes *jumper*s na qual são realizadas as várias ligações. A alimentação é realizada no *jumper* 5, e no *jumper* 1 é a saída do sinal amplificado proveniente da célula de carga. No *jumper* 2 é ligada a célula de carga, onde os 2 primeiros canais são a alimentação a 10 V da célula, e nos outros 2 canais o sinal recebido da célula.

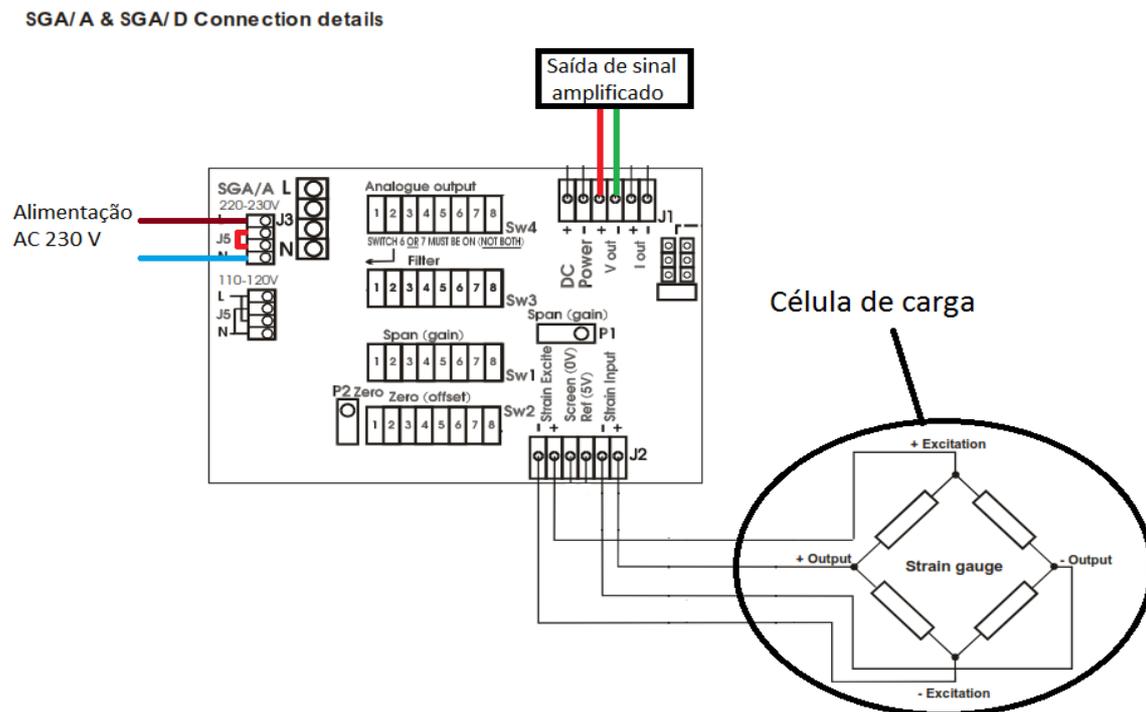


Figura. 3.15- Esquema de ligações de condicionador de sinal

Porém o sinal que sai do condicionador vai ligar diretamente ao *pinout* da placa de aquisição, nomeadamente o *Vout+* ao *pinout* 68 e o *Vout-* ao *pinout* 34 (figura 3.14). Foi também inserida uma resistência de 25k entre o *pinout* 34 e 67, para diminuir o ruído partilhando assim as mesmas massas. Para a ligação da placa ao controlador foram utilizados os *pinout* 22 e 56, onde um é a ligação do sinal de controlo para o controlador e o outro a ligação à fonte de alimentação, respetivamente.

Contudo na figura 3.14 é possível visualizar as ligações realizadas na placa de aquisição de dados.

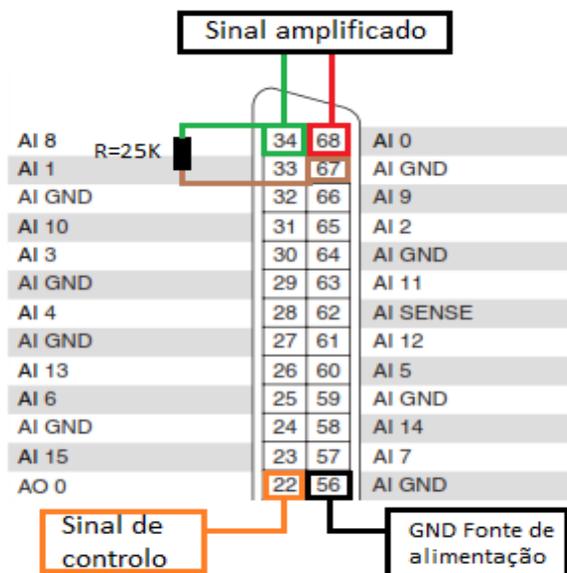


Figura. 3.16- Pinouts da placa de aquisição

A ligação de alguns dos equipamentos está representada na figura. 3.15 onde é possível visualizar a ligação da fonte de alimentação, do amplificador de sinal bem como da placa de aquisição e a célula de carga.

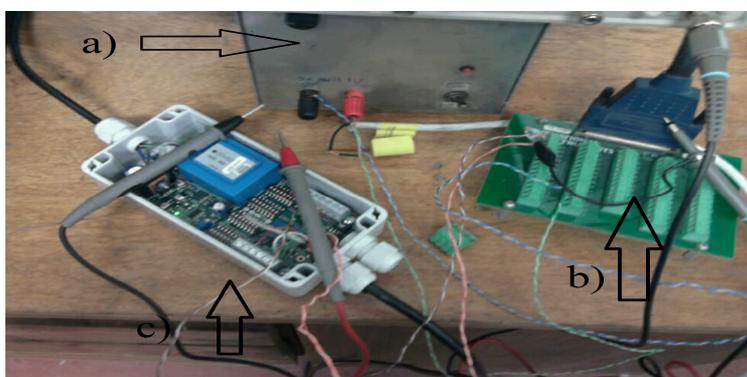


Figura. 3.17- Ligações dos equipamentos; a) Fonte de alimentação, b) Terminal de ligação à placa de aquisição de dados, c) Condicionador de sinal.

### 3.6 Software

O controlo do sistema é realizado através de interface gráfica em *LabVIEW®*, programa que permite fazer o controlo do sistema de aplicação de carga cíclica, onde é possível definir vários parâmetros tais como a carga mínima, a carga máxima, frequência, tempo de estágio entre outros.

### 3.6.1 Painel frontal

O programa é dividido em duas partes, o painel frontal, apresentado na figura 3.16, onde se encontra toda a interface com o utilizador e o diagrama de blocos, onde é realizada toda a sua programação. A figura abaixo representa o painel frontal do programa desenvolvido em *LabVIEW®* para proceder ao controlo de todo o sistema. Este painel pode ser dividido em três partes, sendo a parte superior esquerda onde pode ser seleccionado pelo operador todos os parâmetros do ensaio, nomeadamente, duração, tipo de onda gerada e a opção gravar dados. Na parte inferior esquerda é representado o sinal elétrico que é gerado no programa, correspondente ao sinal de controlo do regulador electropneumático. Por fim o gráfico de maiores dimensões da parte direita corresponde à leitura onde é representada a carga instantânea aplicada na célula de carga.

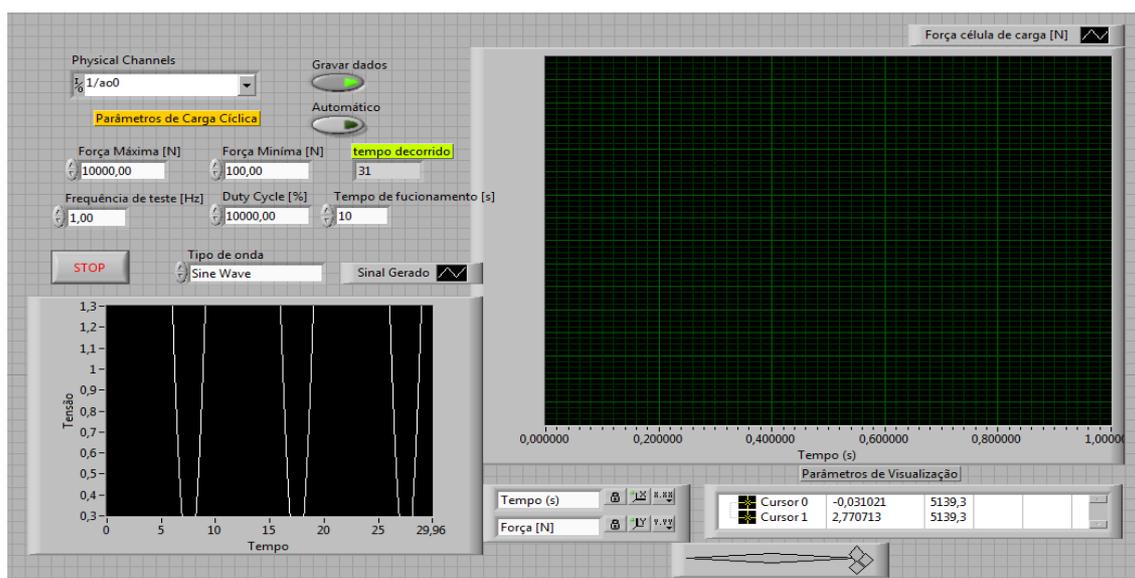


Figura. 3.18- Painel Frontal

### 3.6.2 Diagramas de blocos

Para a elaboração do programa propriamente dito, foi tido em conta como base de construção alguns exemplos da biblioteca do *LabVIEW®*, sendo que foram convenientemente alterados com o intuito de obter o programa final desejado. O programa geral é representado na figura 3.17, construído com blocos e funções, onde é representado numa interface gráfica todo o sistema de controlo.

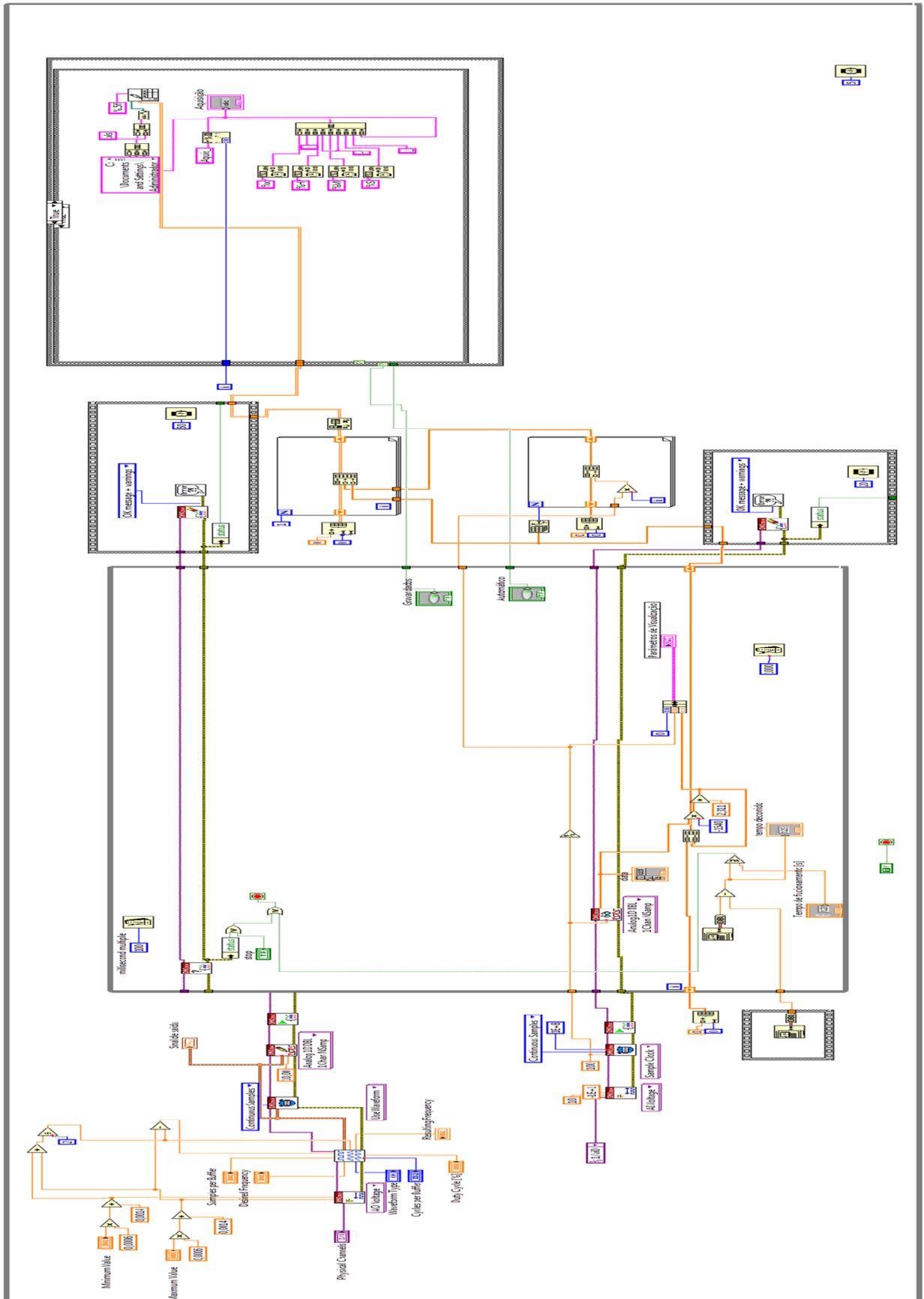


Figura. 3.19- Diagrama de blocos

Este esquema por sua vez pode ser subdividido em três partes de forma a poder ser explicado melhor o seu funcionamento como é possível verificar na figura 3.18.

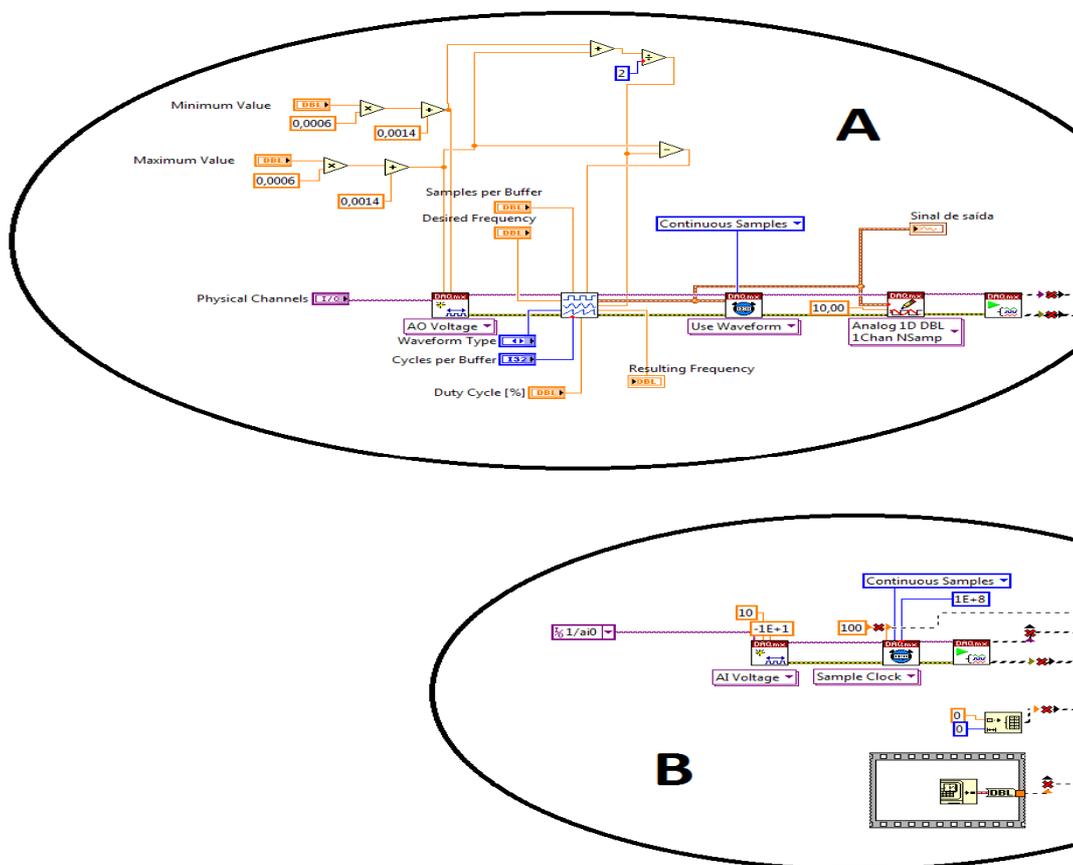


Figura. 3.20- Variáveis de entrada: a) Configuração de gerador de ondas. b) Configuração de canal de aquisição de dados

Numa fase inicial do programa foram definidas as variáveis, podendo estas ser alteradas para cada diferente tipo de ensaios, como o caso da carga máxima, mínima e a frequência, que são todas as variáveis que o utilizador pode alterar durante os vários ensaios. Nesta mesma fase e como é possível observar na figura 3.18 para a configuração das variáveis de entrada, existem duas partes, sendo uma referente à geração do sinal elétrico (A) e a outra relativamente à aquisição de dados (B).

Para configurar o gerador de onda foram necessários definir alguns parâmetros, nomeadamente a carga máxima, carga mínima, frequência, *offset* e a amplitude. Como estas duas variáveis variam em função da carga máxima e mínima elas foram definidas da seguinte forma:

$$Offset = \frac{Carga\ máxima + Carga\ mínima}{2} \quad Eq. (5)$$

$$Amplitude = Carga\ máxima - Offset \quad Eq. (6)$$

Por sua vez as configurações do gerador de ondas para as cargas máximas e mínimas são definidas em tensão, ou seja, ao inserir os dados das cargas em N é necessário haver uma conversão para V, e para tal é utilizada a equação da calibração da célula de carga já determinada anteriormente.

$$y = 1642,4x + 4,244 \quad Eq.(7)$$

Como já referimos anteriormente x representa a tensão de saída do sinal amplificado e y representa a carga em N. Contudo o que se pretende é precisamente o contrário, obter o valor de tensão em função dos valores de N inseridos, então temos:

$$y = 1642,4x + 4,244$$

$$y - 4,244 = 1642,4x$$

$$x = \frac{y - 4,244}{1642,4}$$

$$x = 0,0006y - 0,0026 \quad Eq. (8)$$

Visto que as configurações do gerador do sinal elétrico terem de ser em V e para o utilizador os valores terem de ser introduzidos em N é necessário implementar esta mesma equação para a carga mínima e máxima para permite fazer a conversão entre os dois valores.

Relativamente à segunda parte do esquema, figura 3.19, este diz respeito ao ciclo em que todo o ensaio é realizado. É neste ciclo onde é feito a aquisição de dados e a visualização num gráfico em tempo real do sinal adquirido, bem como a conversão dos dados obtidos pela placa de aquisição. Para que este ciclo seja interrompido é necessário que o utilizador encerre o programa ou que o tempo de ensaio definido pelo utilizador termine.

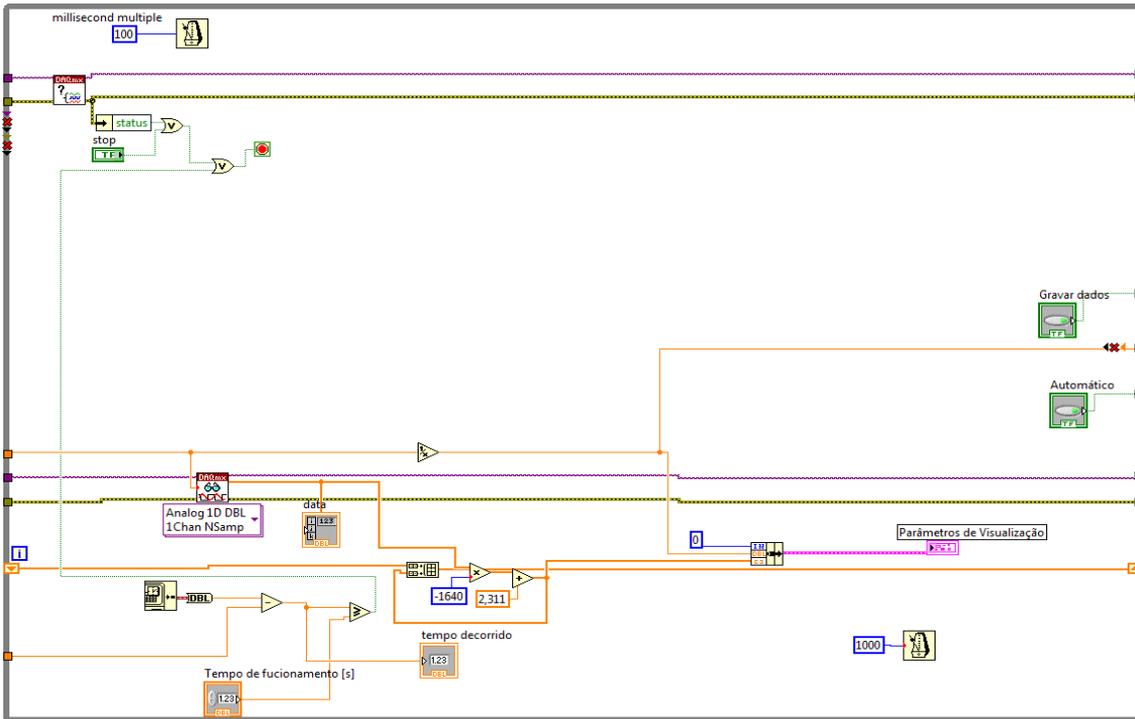


Figura. 3.21- Ciclo

Por fim a terceira e última parte do esquema representa o tratamento de dados antes de serem gravados automaticamente num diretório e extensão pré-definida ou ser gravados manualmente pelo utilizador (figura 3.20).

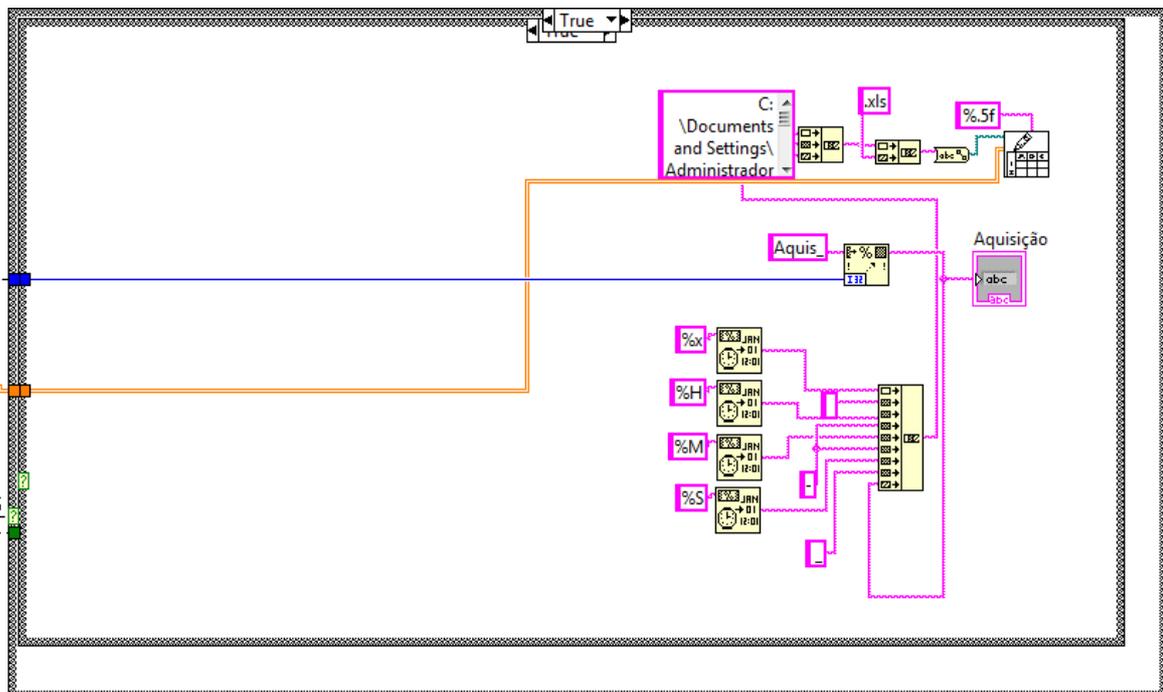


Figura. 3.22- Gravar dados



## 4 UPGRADE DO PROJETO EXISTENTE

Com este trabalho pretende-se dar continuidade ao projeto já existente, foram tidas em conta algumas considerações para o melhoramento de todo o sistema. Após uma análise detalhada concluiu-se que era necessário proceder a algumas melhorias em várias partes. As melhorias seriam na interface com o utilizador, a necessidade de incrementar algumas funcionalidade do sistema bem como a questão de segurança dos utilizadores. As melhorias relativamente à estrutura são a implementação de um apoio para a barra central, barra na qual é aplicada a carga sobre a célula de carga, que apresentava oscilações ao serem aplicadas cargas elevadas uma vez que o movimento do atuador não é axial. E um outro apoio que impossibilite a barra de sair entre a célula de carga e do atuador de membrana. O desenvolvimento destes apoios tem como objetivo a limitação oscilações da barra e mais segurança para os utilizadores.

Relativamente a parte do controlo do sistema o melhoramento é na parte do programa já desenvolvido em trabalhos anteriores. Este programa teria de sofrer várias modificações e o acrescento de algumas novas funcionalidades, sendo uma delas a troca do sistema de aplicação de carga onde anteriormente era aplicado um sinal elétrico em forma de uma onda sinusoidal pura, por um sinal elétrico de uma onda quadrada. Com esta modificação é implementado a função de *duty cycle*, ou seja, o tempo em percentagem que o atuador pneumático está a encher em cada período (máximo e mínimo de carga aplicada). Este tipo de sinal tem como principal objetivo a possibilidade em aplicar uma maior amplitude entre cargas, aumentando a percentagem de tempo de aplicação de carga (atuador a encher/esvaziar ar comprimido).

Aumentar o número de canais de aquisição é também uma melhoria a realizar, visto que anteriormente só era adquirido o sinal de célula de carga. Foi necessário aumentar em dois o número de canais de aquisição, sendo um o sinal elétrico gerado e o outro o sinal proveniente do regulador electropneumático que representa a pressão em bar.

Outras funcionalidades instaladas foram a implementação de um *offset*, sistema que permite regular a carga inicial para cada ensaio. Verificou-se que seria necessário haver uma calibração de valores para cada ensaio, deste modo foi implementada no programa a possibilidade de alterar os dados de entrada durante os ensaios, e a determinação das várias calibrações para cada ensaio. Com estas calibrações determinadas, foi inserida uma opção que permite a utilização das calibrações pré-definidas assim como inserir e determinar as calibrações manualmente.

Após cada ensaio verificava-se que permanecia pressão no atuador pneumático, sendo assim foi necessário implementar uma função que permita após cada ensaio esvaziar o atuador, libertando assim o sistema de qualquer carga. Por fim foi necessário realizar uma melhoria no sistema de gravação de dados, diferenciando os dados gravados identificando as colunas e nomear cada tipo de ensaio diferente.

#### **4.1 Desenvolvimento dos apoios**

Com a finalidade de fazer um melhoramento tanto na aplicação da carga bem como na segurança do utilizador foram considerados e estudados várias possibilidades, chegando à conclusão de desenvolver dois tipos de apoios. Um que permitisse fazer a limitação da barra na horizontal, ao ser aplicada carga não seja possível retirar a barra, e um outro apoio que restrinja qualquer movimento da barra na horizontal.

Para a sua elaboração foram tidos em conta os desenhos dos dois apoios desenvolvidos (figura 4.1), também disponíveis no Anexo J. Para acoplar estes dois tipos de apoios foi necessário soldar o tubo representado na figura 4.1b), numa das chapas de suporte do atuador pneumático, enquanto que no outro caso foram desenvolvidos dois apoios que pudessem ser aparafusados à estrutura, figura 4.1a).

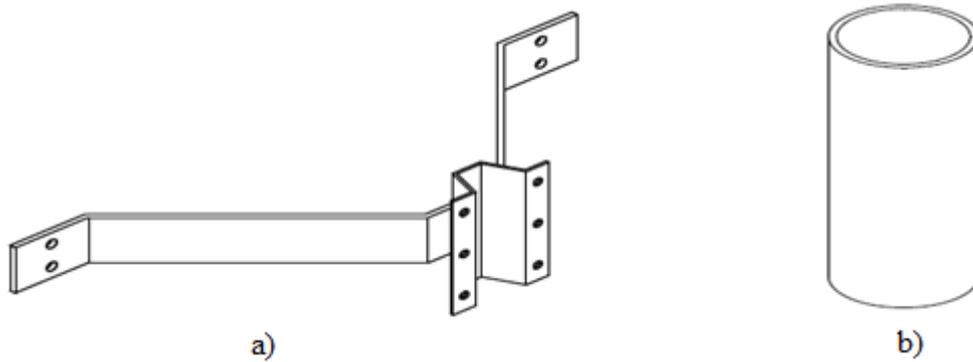


Figura. 4.1- Esquemático dos apoios desenvolvidos. a) Apoio de limitação de movimentos verticais. b) Apoio de segurança

Estando os dois apoios parafusados na estrutura e o tubo soldado, o movimento da barra fica limitado apenas ao movimento vertical, apesar de ao serem aplicadas elevadas cargas esta poder apresentar algumas oscilações devido ao sistema de aplicação de carga ser pneumático. Com estes tipos de apoios os deslocamentos são mínimos e é assegurada a segurança do utilizador e do equipamento. A figura 4.2 apresenta uma fotografia do sistema de apoio desenvolvido.

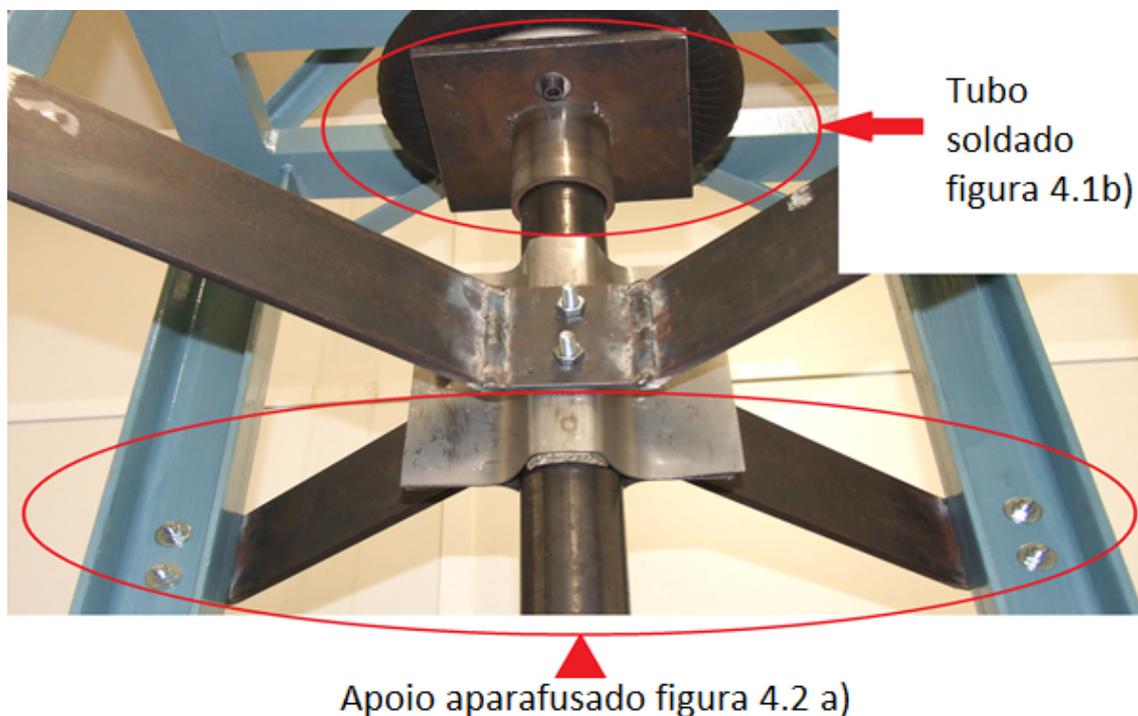


Figura. 4.2- Aplicação dos apoios

## 4.2 Upgrade do Software

Relativamente ao *upgrade* do *software* este foi feito tanto na interface com o utilizador como na parte de programação, implementando assim as funcionalidades referidas anteriormente.

### 4.2.1 Painel Frontal

Para a interface utilizador/programa foi realizada uma melhoria do programa, mantendo a fácil interação e aumentando o grau de complexidade do mesmo, implementando assim as novas funções, tais como a utilização do *duty cycle*, o ciclo de esvaziamento do atuador, o *offset* entre outros.

Como é possível ver na figura. 4.3, este programa é mais complexo que o anterior, foi também elaborado um manual de utilização para consulta disponível no Anexo H. Relativamente ao painel frontal é possível dividi-lo em quatro partes. Sendo a primeira parte onde todo o controlo é realizado, nomeadamente o controlo das variáveis, as calibrações e a gravação dos dados.

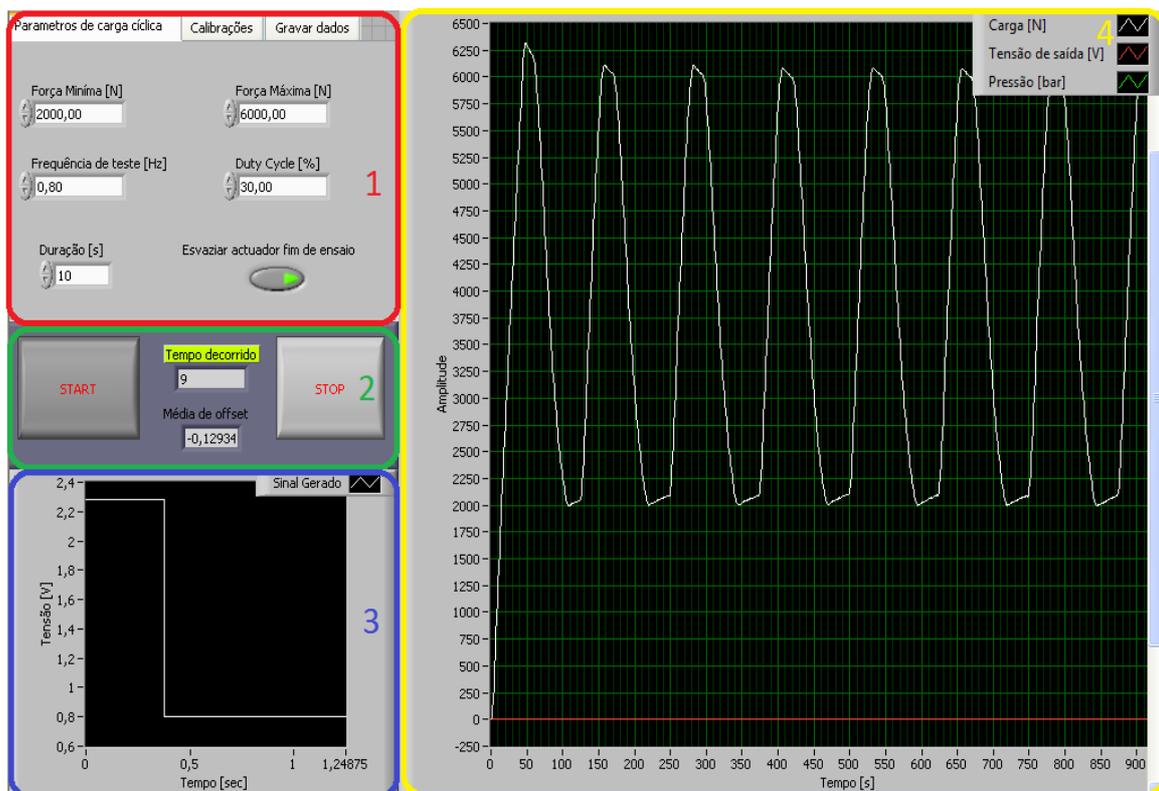


Figura. 4.3- Painel Frontal: 1) Controlo do sistema; 2) Inicialização/paragem; 3) Sinal elétrico enviado para o controlador; 4) Visualização da Carga aplicada

A segunda parte referente ao painel frontal diz respeito à inicialização e paragem do programa, onde o controlo é realizado. Apesar do indicador de tempo decorrido já existir na versão anterior do programa foi acrescentado mais um indicador, o da média de *offset*. Como está a ser sempre exercida uma determinada carga na célula de carga, visto que está apoiada permanentemente sobre si a barra na qual é aplicada a força, quando se realizavam as leituras os valores obtidos nunca eram zero. Para anular estas cargas iniciais que se verificaram e que aumentam com o aumento das alturas do atuador foi inserida a função para determinar o valor de *offset*.

A Visualização dos dados é feita na 3ª e 4ª parte, que representam as leituras do sinal de controlo enviado para o regulador electropneumático e a leituras do sinal da variação de carga durante os ensaios respetivamente.

Por sua vez a parte de controlo (figura 4.4) é dividida em três separadores, sendo eles o "Parâmetros de carga cíclica", "Calibrações" e "Gravar dados". Neste primeiro separador são definidos os parâmetros para a realização de cada ensaio, é definida a carga máxima, mínima, o *duty cycle*, a frequência de teste bem como o seu tempo de funcionamento e uma das novas funções inseridas que representa a possibilidade em esvaziar o atuador no fim de cada ensaio.

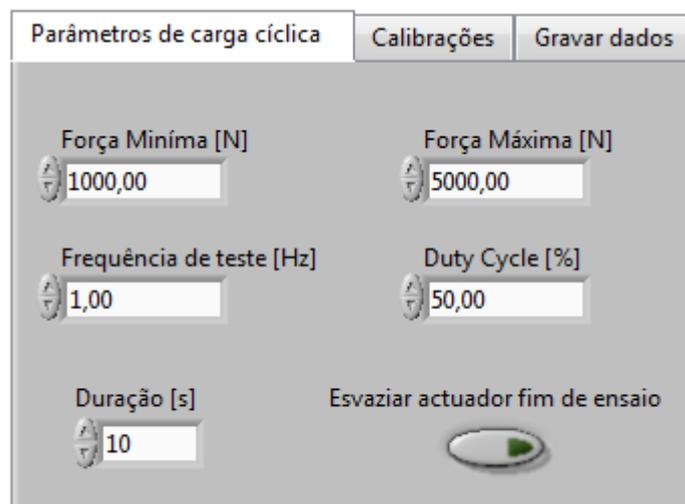


Figura. 4.4- Separadores Parâmetros de carga cíclica

Este novo separador criado é referente à conversão dos valores inseridos no programa, nomeadamente a conversão dos valores de carga (Newton) para valores de tensão (Volt) que são usados no gerador de onda quadrada. Como foi referido no capítulo anterior para fazer esta conversão foi utilizada a equação:

$$x = 0,0006y - 0,0026 \quad \text{Eq. (9)}$$

Após a realização de alguns testes verificou-se ser necessário alterar as calibrações para cada amplitude, verificando com o aumento das variáveis de entrada (frequência, *duty cycle*, altura, carga máxima e mínima) que a carga observada durante os ensaios não era a pretendida inicialmente. Sendo portanto necessário haver um ajuste nas calibrações para cada amplitude. De tal forma foi criado uma lista de valores de calibração, disponível no Anexo I, onde foram determinados para cada amplitude e para as diferentes alturas os valores de calibração máxima e mínima. Como é possível verificar na figura 4.5 estas calibrações representam as calibrações pré-definidas, onde escolhendo simplesmente a altura do ensaio e as cargas pretendidas a escolha das calibrações é realizada automaticamente.

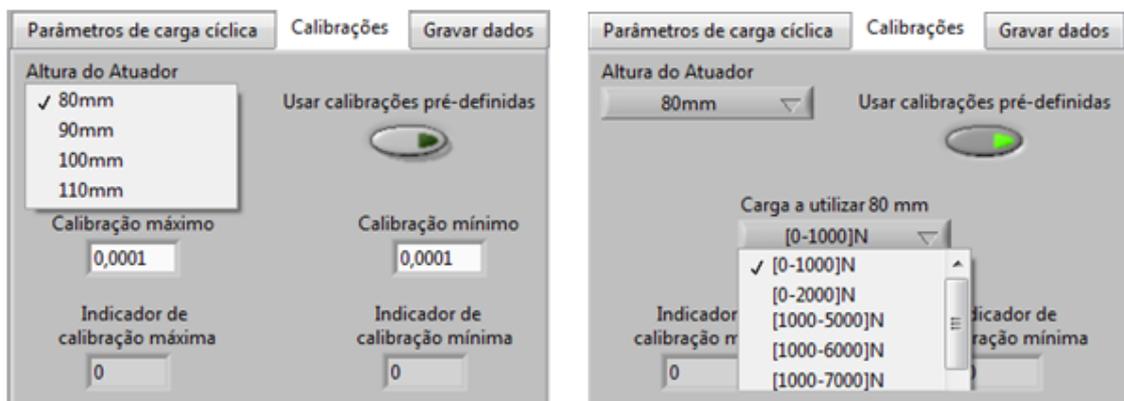


Figura. 4.5- Separadores de Calibrações

Para a eventualidade de querer realizar um ensaio onde não conste a calibração para as cargas desejadas ou por qualquer eventualidade os valores pré-definidos para as cargas não sejam atingidos foi introduzido uma opção que permite inserir estes valores manualmente. Estes valores de calibração poderão ser ajustados entre 0,00065 a 0,0002, tanto para a carga máxima quer para a carga mínima.

Todos os valores de calibrações estão disponíveis no Anexo I para consulta.

Por fim o terceiro e último separador é referente à gravação de dados (figura 4.6), onde simplesmente são definidas a opção de gravar dados. Se o processo de gravação é automático ou manual e definido para gravação automática o diretório do ficheiro gerado.

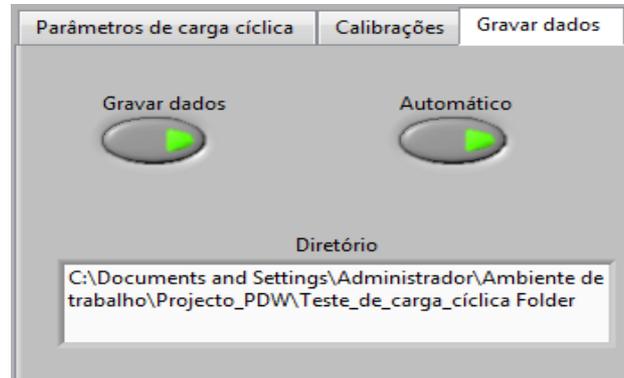


Figura. 4.6- Separador Gravar dados

### 4.2.2 Diagrama de blocos

Como é possível visualizar, a figura 4.7 representa o diagrama de blocos desenvolvido para este programa. Como era pretendido foram acrescentadas as novas funcionalidades ao programa já existente. Como já mencionado anteriormente as funções que foram acrescentadas foram:

- *Offset*;
- *Start*;
- Ciclo de esvaziamento.

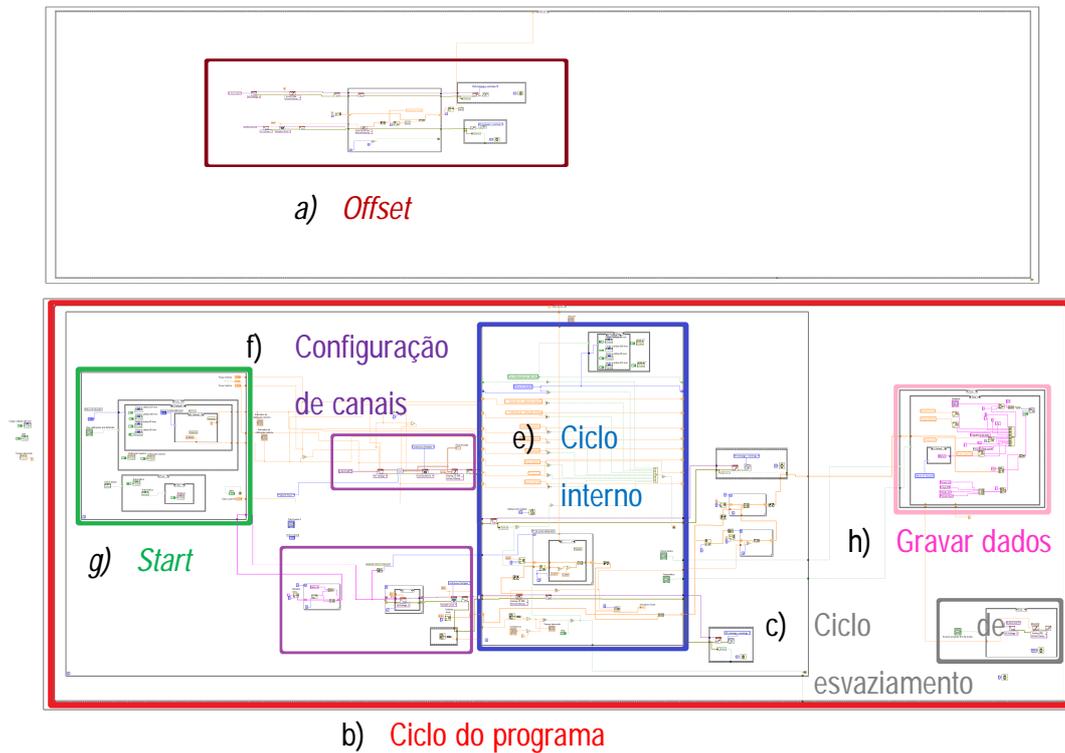


Figura. 4.7- Diagrama de blocos: a) *offset*; b) *Start*; c) Configuração de canais; d) Ciclo interno; e) Gravar dados; f) Ciclo de esvaziamento; Ciclo do programa.

Estas foram as funções acrescentadas, no entanto algumas das existentes sofreram algumas alterações. De forma a explicar o funcionamento do programa vão ser descritas cada uma das partes do programa identificadas na figura 4.7.

### ***Offset***

Com a variação das alturas do atuador pneumático verificou-se que quanto menor fosse a altura utilizada maior era a carga aplicada inicialmente sem ser exercida qualquer pressão, visto que com o diminuição da altura significava o atuador estar mais compacto e assim exercendo uma certa pressão. Para contrariar esta situação foi necessário acrescentar um ciclo de *offset* (figura 4.8) onde independentemente da altura a carga registada sem aplicação de pressão fosse 0 N.

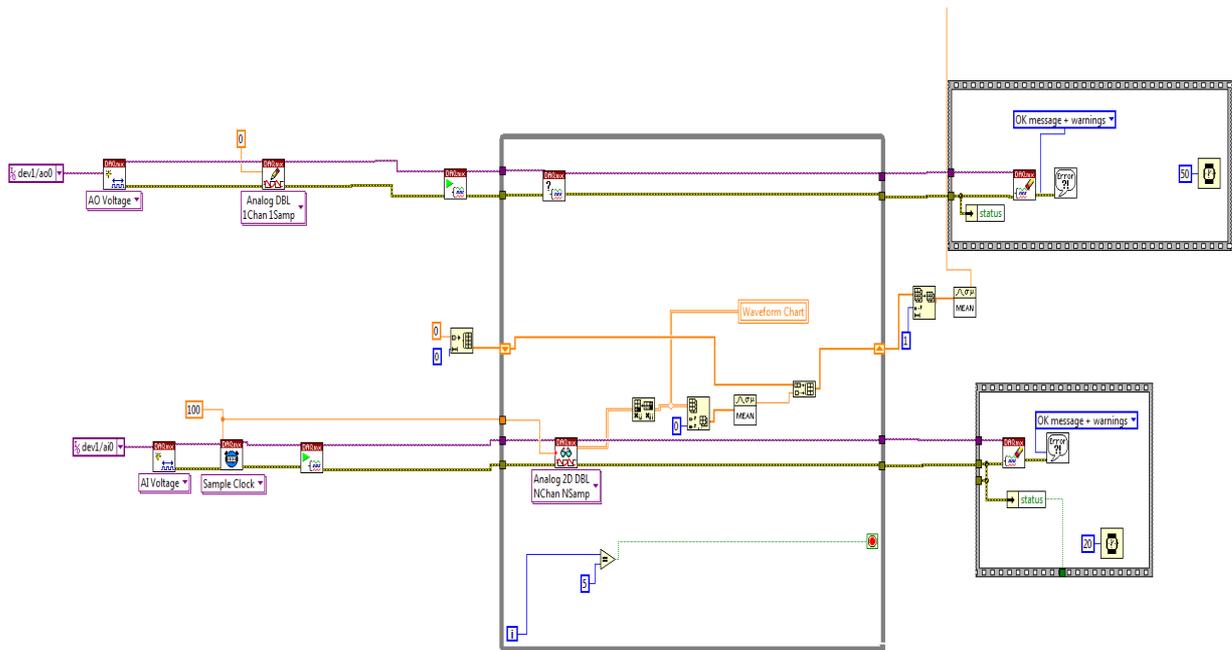


Figura. 4.1- Offset

Para essa finalidade foi criada uma sequência inicial para que antes de iniciar cada ensaio fosse possível ajustar o valor de *offset*. Este pequeno ciclo, apresentado na figura 4.8, o que faz é enviar um sinal elétrico para o regulador electropneumático de 0 V, correspondente a 0 bar, e adquirir para essa mesma carga o valor da célula de carga. Para a aquisição deste valor é realizada a média de 6 aquisições, ou seja, este ciclo é repetido 6 vezes, sendo o primeira excluído para haver tempo de o atuador esvaziar completamente. Este valor será depois utilizado para subtrair na configuração da célula de carga no ciclo geral do programa, e que também é apresentado no mostrador do painel de controlo como já mencionado anteriormente.

### Start

O *start* representa simplesmente um ciclo onde são definidas todas as variáveis do sistema, o que permite antes de iniciar cada ensaio definir as variáveis. Este ciclo foi criado para apesar de o programa estar a correr, ficasse em modo de espera até ser pressionado o botão *start* ficando as variáveis “presas” dentro deste ciclo. Somente após ser pressionado o *start* é que o ensaio é inicializado e onde são “libertadas” as variáveis para a configuração dos canais. A figura 4.9 apresenta o ciclo utilizado para a função *start*.

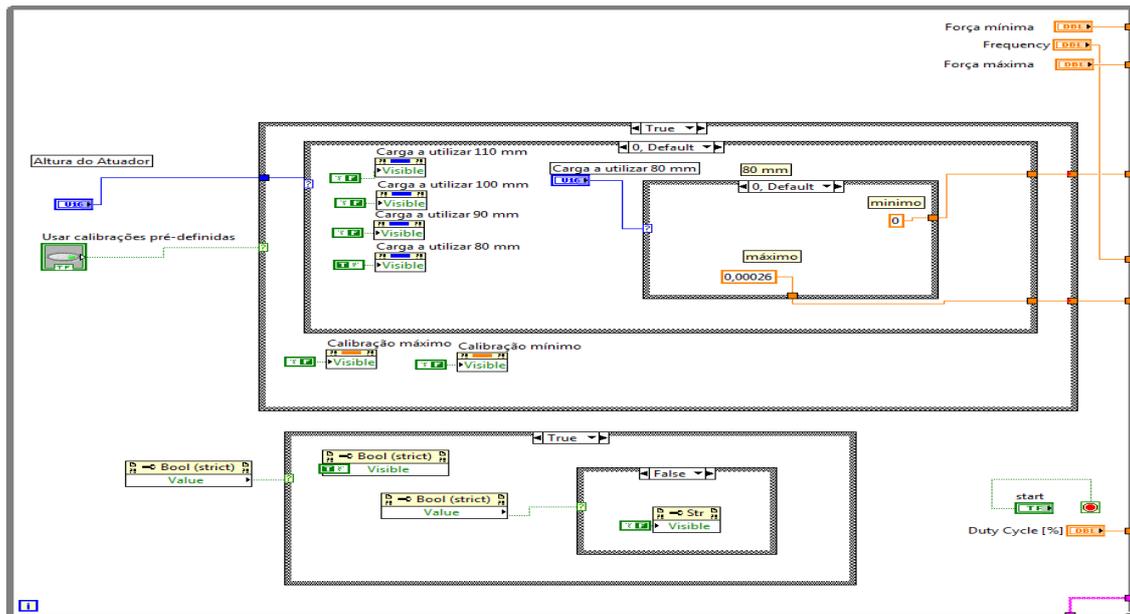


Figura. 4.9- Start

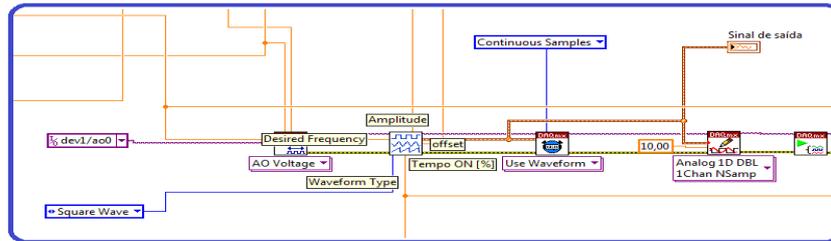
### Configuração de canais

Relativamente à configuração dos canais foi necessário realizar algumas conversões para uma utilização mais intuitiva por parte do utilizador. Como é possível verificar na figura 4.10 para a configuração do gerador de onda é necessário definir o *offset*, a amplitude, a frequência, o tipo de onda e o tempo ON % (*duty cycle*). No entanto para definir o *offset* e a amplitude é necessário realizar uma conversão de valores, onde o valor de *offset* e de amplitude são definidos em função dos valores de carga máxima e mínima como já referido no capítulo 3.6.2, onde:

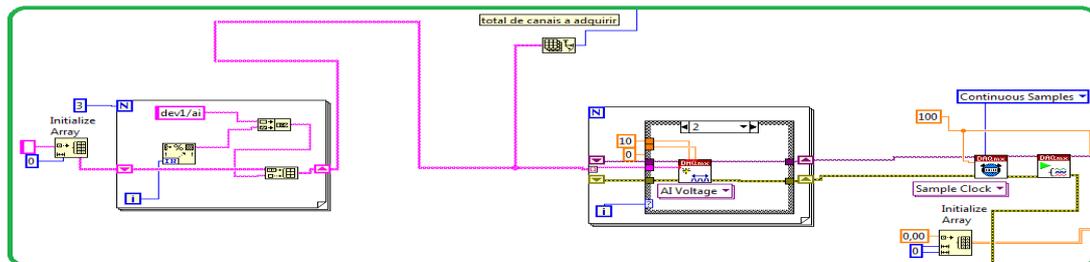
$$offset = \frac{Carga\ máxima + carga\ mínima}{2} \quad \text{Eq. (10)}$$

$$Amplitude = Carga\ máxima - offset \quad \text{Eq. (11)}$$

Esta conversão deve-se simplesmente ao facto de ser mais fácil para o utilizadores utilizar os valores de carga para definir os valores de *offset* e de amplitude, e assim esta conversão de valores é realizada automaticamente.



a) Gerador de sinal



b) Aquisição de sinal

Figura. 4.2- Configuração de canais: a) Gerador de sinal; b) Aquisição de sinal.

Relativamente às restantes configurações de ambos os canais, é definido o tipo de onda gerada assim como o canal respetivo da placa de aquisição de dados para o gerador de sinal e são definidos os 3 canais de aquisição relativamente à aquisição de dados

### Ciclo interno

Este ciclo interno refere-se ao funcionamento do programa durante cada ensaio, onde todas as funções permanecem ativadas enquanto uma delas não seja validada. Quando uma função é validada, neste caso o tempo, o programa sai deste ciclo interno e é concluído o ensaio, permitindo assim a gravação dos dados se for desejado. Contudo este ciclo interno teve algumas alterações em relação ao programa anterior, visto que se verificava não ser possível alterar as variáveis durante o decorrer de um ensaio.

De tal forma dentro do ciclo interno do programa foram criadas condições lógicas, em que sempre que houvesse uma alteração de qualquer uma das variáveis este ciclo era reiniciado. Possibilitando, assim, ajustar as calibrações de cargas assim com alterar as cargas durante o respetivo ensaio. A figura 4.11 apresenta a programação gráfica do ciclo interno desenvolvido.

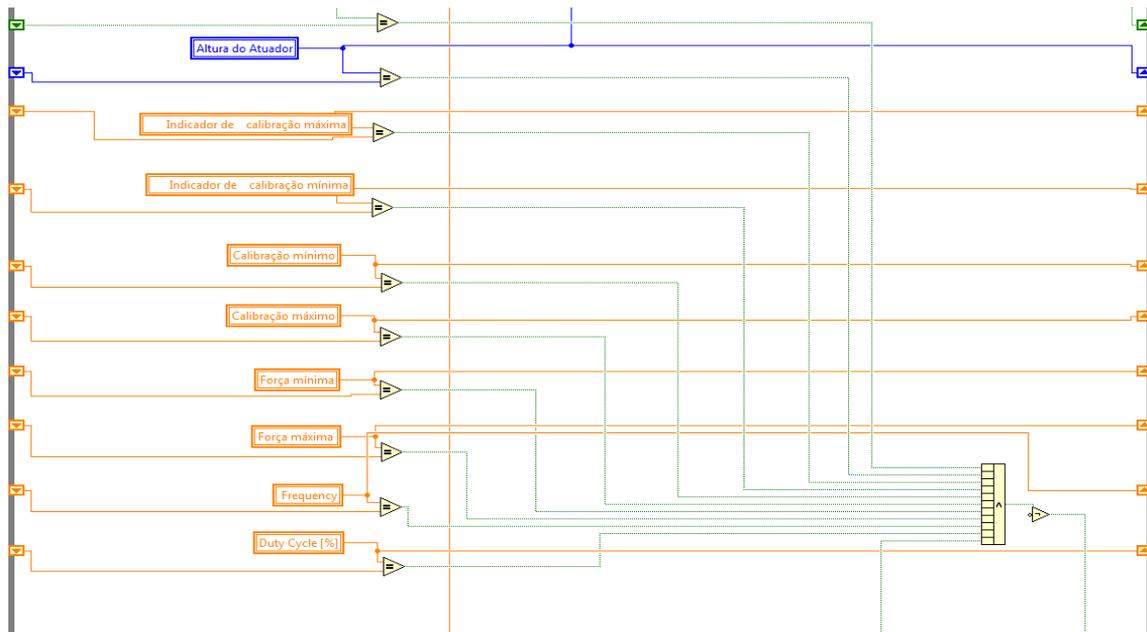


Figura. 4.3- Condições lógicas de ciclo interno.

É também dentro deste ciclo que é realizada a aquisição de dados, e como foram acrescentados mais dois canais foi necessário proceder à sua interpretação. Como o primeiro canal acrescentado corresponde à leitura da tensão que é enviado para o regulador electropneumático não foi necessário realizar uma conversão de valores uma vez que a placa de aquisição adquire valores de tensão.

O mesmo não acontece com o segundo canal inserido, que representa a pressão em bar que o regulador está a debitar ao atuador. Como o sinal proveniente do regulador é em valores de tensão foi necessário realizar uma conversão de valores para que os valores adquiridos fossem em bar. Como o regulador tem um mostrador onde é possível ver a pressão debitada foram realizados vários testes comparando o valor do mostrador e o valor de tensão proveniente com a qual se elaborou a tabela 4.2:

Tabela 4.1- Tabela de conversão de valores.

<b>Tensão do regulador [V]</b>	<b>Pressão do mostrador [bar]</b>
0,9	0,07
1,2	0,44
1,4	0,89
1,6	1,33
1,1	0,22
1,3	0,66
1,5	1,12
1,7	1,57
1,8	1,79
1,9	2,02
2	2,24
2,2	2,69
2,4	3,14
2,6	3,6
2,8	4,04
2,3	2,91
2,5	3,37
2,7	3,82
2,9	4,27
3	4,5
3,1	4,71
3,2	4,94
3,3	5,17
3,4	5,4

Relacionando as duas colunas foi determinada uma equação que permite a conversão dos valores de tensão adquiridos em valores de pressão. Sendo a equação que define esta conversão a seguinte:

$$y = 2,2223x - 2,1844 \quad \text{Eq. (12)}$$

Onde y representa os valores finais em pressão e x os valores de tensão adquiridos.

Como é possível verificar na figura, estes são os canais adquiridos pela placa de aquisição de dados. Sendo o primeiro o sinal proveniente da célula de carga que permite a leitura da carga aplicada, representado na figura 4.12-a) com o ajuste de *offset* proveniente do ciclo inicial. As figuras 4.12 b) e c), representam, respetivamente, o sinal de tensão enviado da placa de aquisição para o regulador, sinal de onda quadrada, e o conversor de valores de tensão em pressão.

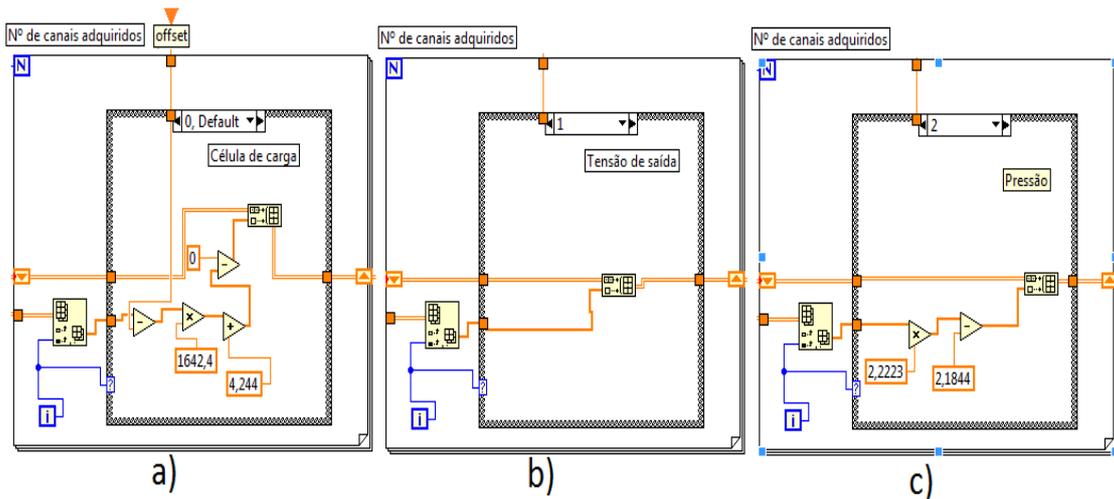


Figura. 4.4-Canais de aquisição: a) Calibração da célula de carga; b) Sinal de tensão enviado para o regulador; c) Conversor de pressão.

## Gravar dados

Como eram realizados diversos ensaios e para ser mais fácil guardar todos esses ficheiros, a forma de guardar dados sofreu algumas alterações. Nomeando cada ensaio que era realizado pela opção de “Gravar dados Automático” como por exemplo, apresentado na figura 4.13:

```

[2000-8000]N_Frequência de teste=0,30Hz _80mm_50% Duty cycle
[2000-8000]N_Frequência de teste=0,30Hz _80mm_60% Duty cycle
[2000-8000]N_Frequência de teste=0,40Hz _80mm_30% Duty cycle
[2000-8000]N_Frequência de teste=0,40Hz _80mm_40% Duty cycle
[2000-8000]N_Frequência de teste=0,50Hz _80mm_40% Duty cycle
[2000-8000]N_Frequência de teste=0,50Hz _80mm_50% Duty cycle

```

Figura. 4.5- Gravar dados Automático

Desta forma é possível guardar todos os ensaios com o menor esforço, onde as próprias variáveis dos ensaios identificam os ficheiros. No que diz propriamente respeito aos dados adquiridos foram simplesmente nomeadas as colunas para sua identificação, segundo apresentado na figura 4.14.

	A	B	C	D
1	Tempo [s]	Carga [N]	Tensão [V]	Pressão [bar]
2	0	6355,458	2,560002	2,33136
3	0,01	6356,51681	2,559035	2,325629
4	0,02	6355,98741	2,558713	2,329211
5	0,03	6356,51681	2,558391	2,330644

Figura. 4.6- Identificação de dados

### Ciclo de esvaziamento

Por fim e como último ciclo do programa foi inserida a opção de esvaziar o atuador no fim de cada ensaio (figura 4.15). A razão da inclusão desta opção no programa, foi devido ao facto de se verificar que dependendo do instante em que o atuador se encontrava, a encher ou a esvaziar, este em algumas situações permanecia com ar comprimido no seu interior., Assim, após serem gravados os dados, com uma instrução simples de enviar um sinal elétrico de 0 V para o regulador este permite o esvaziamento completo do atuador pneumático.

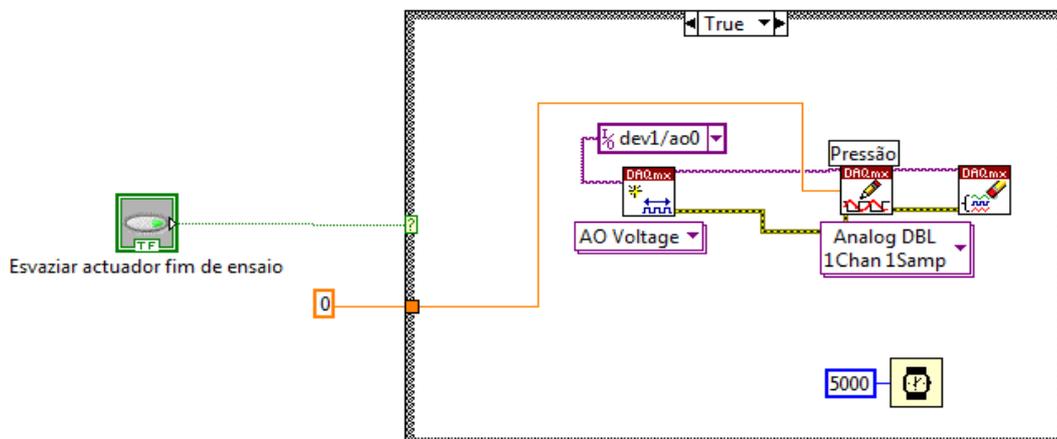


Figura. 4.7-Ciclo de esvaziamento



## 5 ANÁLISE E DISCUSSÃO DE RESULTADOS

Neste capítulo serão estudados e interpretados todos os ensaios realizados a fim de determinar todos os pontos críticos do sistema, recorrendo a tabelas e gráficos para determinar quais os limites e quais as melhores condições do sistema. Serão realizados ensaios para determinar todas as combinações possíveis. Para determinar todo o tipo de combinações serão realizados ensaios sistemáticos começando com o ensaio de 0-1000 N e acrescentando para cada novo ensaio uma carga de 1000 N até alcançar a sua carga máxima, onde para cada intervalo sejam alternadas todas as variáveis combinando assim todas as soluções.

Para realizar uma análise do sistema (com a finalidade de determinar as melhores condições e os seus limites) as variáveis a considerar são:

- Carga máxima;
- Carga mínima;
- Frequência;
- *Duty cycle*;
- Linearidade;
- Repetibilidade;
- Altura do atuador.

Com as variações destas variáveis, foram efetuados vários casos de estudo com o objetivo de abordar todos os requisitos para com o sistema, sendo alguns requisitos a considerar os seguintes:

- Qual a carga máxima do sistema para cada altura do atuador?
- Quais as melhores condições a que o sistema pode operar para cada altura?
- Frequência máxima e mínima que o sistema pode operar para as diferentes alturas;
- Qual a melhor percentagem de *duty cycle* a utilizar para cada tipo de ensaio?
- Quais as maiores amplitudes atingidas em cada frequência?

## 5.1 Ensaios

Com a realização dos ensaios verificou-se que há sempre uma repetibilidade nos resultados obtidos, para tal, e com a intenção de diminuir o tamanho dos ficheiros foram somente realizados ensaios com um período de tempo de 10 s. Serão somente apresentados alguns ensaios aleatórios como demonstração do tipo de dados obtidos, visto que a quantidade de ensaios validados era bastante elevada, então optou-se por mencionar somente alguns desses ensaios para verificação. Todos os restantes ensaios validados para este sistema estão disponíveis para consulta, no Anexo E. No entanto, foram feitas algumas limitações no sistema com a intenção de diminuir alguns ensaios, limitando assim, a faixa de algumas das variáveis. Uma das limitações imposta foi a altura de operação do atuador pneumático, sendo que os seus limites de operação se encontram entre as alturas de 50 a 140 mm, sob consulta no Anexo A. Devido às oscilações que se verificaram em alguns ensaios para alturas extremas as alturas foram limitadas a quatro alturas, 80 mm, 90 mm, 100 mm e 110 mm.

Relativamente à frequência, como o objetivo era determinar a faixa de operação, verificou-se que era sempre possível realizar ensaios para baixas frequências no entanto estes valores não eram relevantes. Portanto, foi imposta uma frequência mínima de operação de 0,3 Hz, sendo apenas necessário determinar a frequência máxima. O mesmo aconteceu para determinar qual a percentagem de *duty cycle* mais indicada para a realização de ensaios. Como o *duty cycle*, neste caso, é a percentagem de tempo num período que o atuador está a encher, onde a 0%, como não está a encher corresponde à carga mínima e a 100% como está sempre a encher corresponde à carga máxima pré-definida. Assim, foram somente utilizadas percentagens de *duty cycle* de 30%, 40% 50%, 60%, 70%, 80% evitando deste modo os valores extremos.

Por fim, em relação à validação ou não validação de ensaios foram feitas algumas considerações. Sendo elas:

Só são considerados válidos os ensaios que apresentem as seguintes características:

- Sejam atingidos os valores de carga máxima e mínima;
- A variação da carga ao longo do tempo seja linear, ou seja, contínua entre a carga máxima e mínima;
- Haja repetibilidade durante o ensaio.

Todos os ensaios que não respeitem estes critérios são considerados não válidos.

O caso de estudo, apresentado a seguir na figura 5.1, foi escolhido aleatoriamente, somente para demonstrar que tipos de dados são adquiridos a cada ensaio, onde é possível visualizar uma variação de carga de 4000 N entre uma carga mínima de 2000 N a 6000 N. É também possível verificar a variação sinusoidal da carga que era requerida e visualizar a sua repetibilidade apesar do ensaio ter uma duração de 10 s.

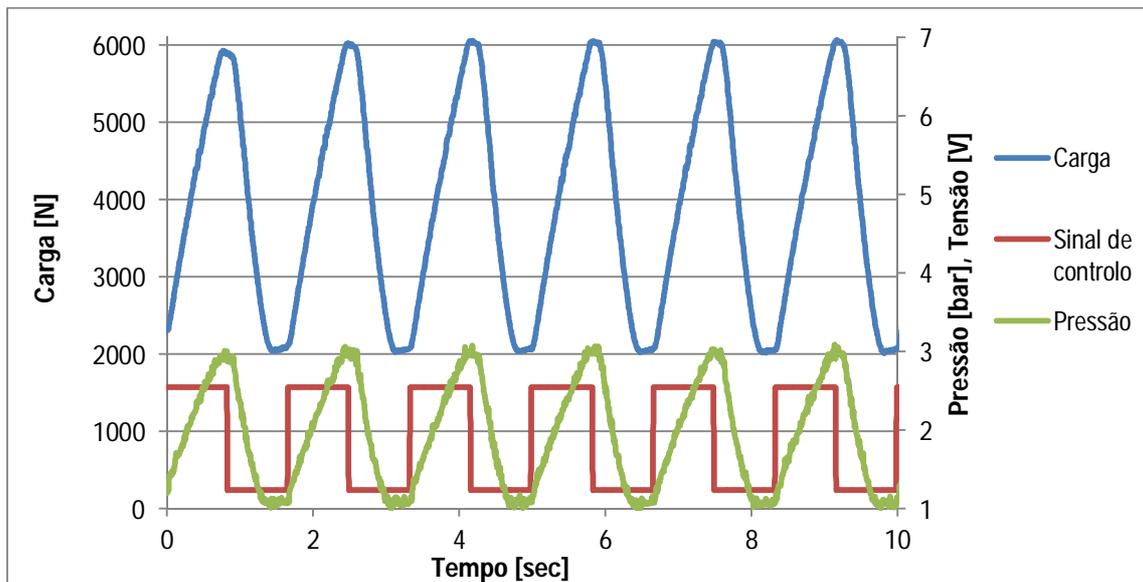


Figura. 5.1-Ensaio a [2000-6000]N; Frequência de teste 0,6 Hz; 110 mm; 50% *Duty cycle*

Com este tipo de dados observa-se também o sinal de controlo do atuador electropneumático em que se verifica ser uma onda quadrada perfeita com um *duty cycle* de 50%, ou seja o tempo em que o atuador tem disponível para aplicar carga e descomprimir é o mesmo. É também possível verificar a proporcionalidade entre as duas ondas sinusoidais, em que uma é a onda de variação da carga e a outra a variação da pressão no regulador electropneumático. Contudo é possível afirmar que quanto maior a carga aplicada, maior a pressão requerida ao regulador electropneumático. Conclui-se então, que para este ensaio, para um sinal de entrada aproximadamente entre 1,2 a 2,5 V corresponde uma variação de carga de 2000 a 6000 N, bem como a uma variação de pressão entre aproximadamente 1 a 3 bar, portanto para esta combinação de diferentes variáveis pode dizer-se que este ensaio é válido.

Relativamente ao gráfico, apresentado na figura 5.2, é possível visualizar a influência do *duty cycle* nos ensaios, onde num período com cerca de 3,3 s e 80% desse tempo, ou seja cerca de 2,6 s o atuador pneumático está a encher. É com esta elevada percentagem de tempo em o atuador está a encher que é possível realizar ensaios para grandes amplitudes. No caso deste ensaio verifica-se uma amplitude de cerca de 10000 N com uma carga máxima de 13803 N e mínima de 1936 N.

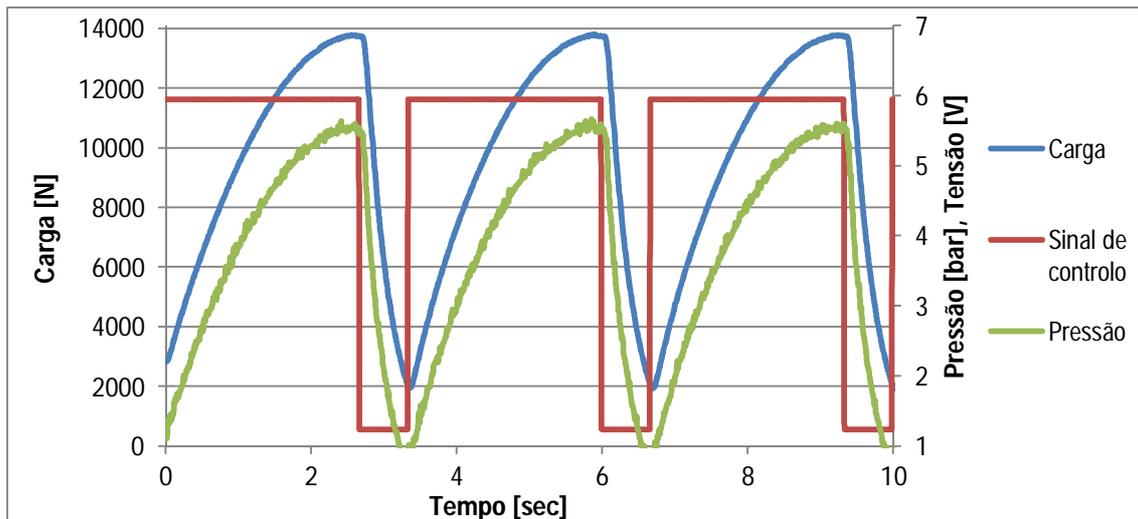


Figura. 5.2-Ensaio a [2000-14000]N; Frequência de teste 0,3 Hz; 80 mm; 80% *Duty cycle*

Tal como no caso anterior, o ensaio apresentado na figura 5.2, também pode ser considerado válido visto que os seus parâmetros de carga máxima e mínima são atingidos, assim como apresenta uma boa repetibilidade de carga cíclica obtida sem oscilações significativas.

Estes foram alguns dos ensaios validados, no entanto existem ensaios que não foram validados devido à não linearidade da aplicação da carga como representa o gráfico da figura 5.3.

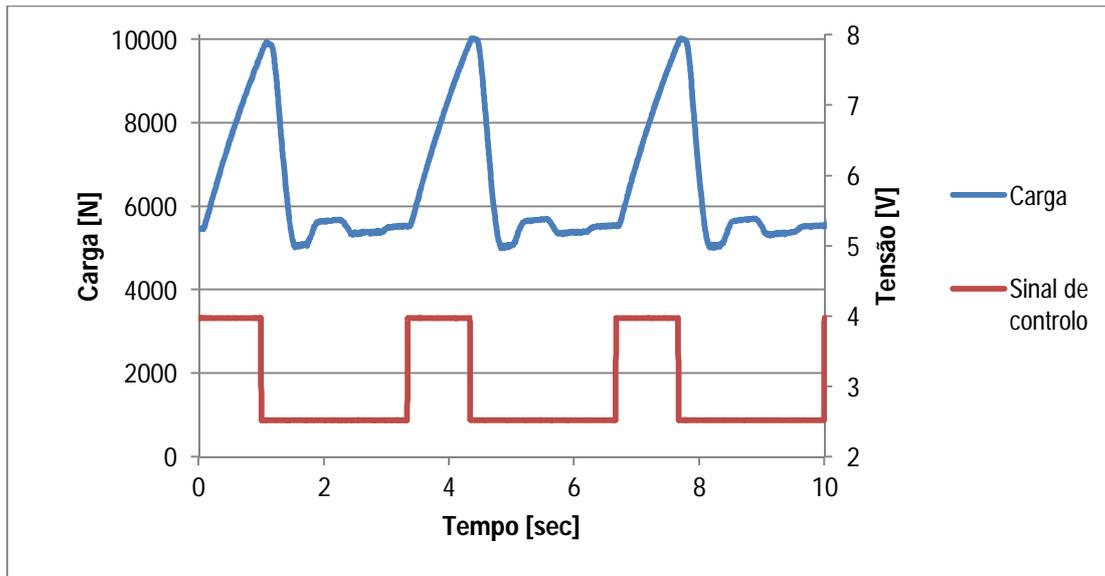


Figura. 5.3-Ensaio a [5000-10000]N; Frequência de teste 0,3 Hz; 90 mm; 30% Duty cycle

Durante o tempo que o atuador está a encher a carga aumenta linearmente até atingir a carga máxima, nesse instante como o sinal elétrico altera dá-se o escape, momento em que o atuador começa a esvaziar até à carga mínima. Devido à inércia do sistema a carga atinge os 5000 N de carga mínima pretendidos mas passados alguns instantes o que se verifica é a carga a não permanecer à carga pretendida inicialmente, mas tende a estabilizar a 5480 N como se verifica no gráfico. Esta diferença de cargas é devida à inércia do sistema e à dificuldade em realizar o controlo num sistema pneumático.

Similarmente ao ensaio anterior, o apresentado na figura 5.4, também não pode ser validado, pois apesar de atingir os parâmetros de carga pretendidos cerca de 1022 e 5190 N não representa uma variação de carga linear.

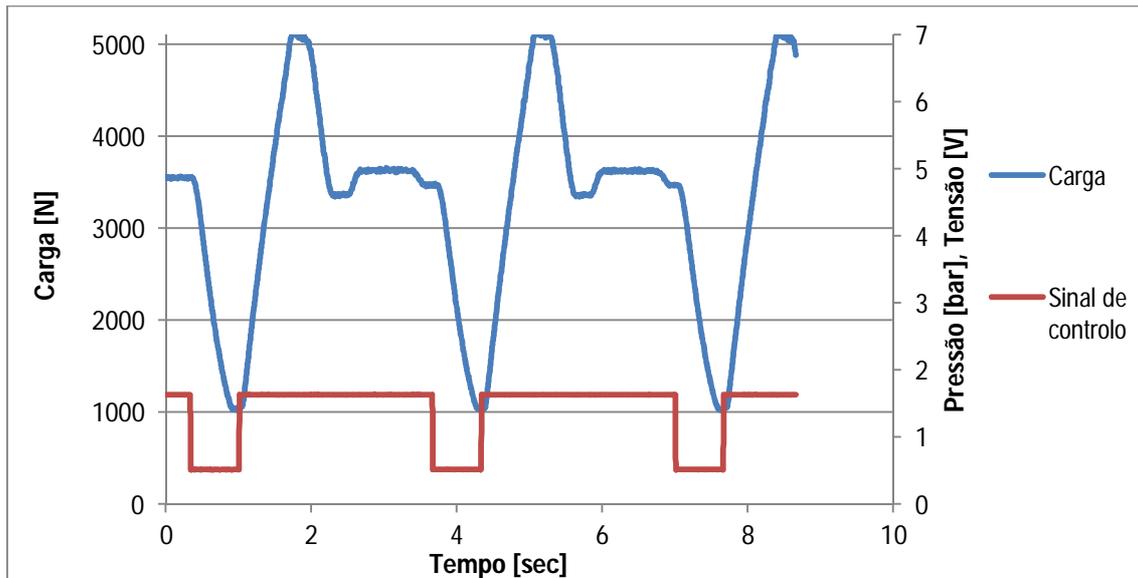


Figura. 5.4-Ensaio a [1000-5000]N; Frequência de teste 0,3 Hz; 90 mm; 80% Duty cycle

Como é possível visualizar através do sinal elétrico de controle, durante todo o tempo que o atuador está a encher a aplicação de carga não é linear, apresentando oscilações durante o tempo de enchimento. Para um sinal elétrico contínuo a variação de carga não é linear, no momento de esvaziamento logo após a carga máxima ser atingida, há uma realimentação do regulador, como se visualiza no gráfico. Acontecendo o mesmo que o caso de estudo anterior onde a carga máxima é atingida devido à inércia do sistema, no entanto não permanece à carga máxima, estabilizando na carga correspondente ao sinal elétrico enviado para o controlador, cerca de 3600 N.

À semelhança dos casos anteriores, o apresentado na figura 5.5, é mais um caso onde não há a validação do ensaio, porém ao contrário dos ensaios anteriores, este apresenta uma variação de carga linear em toda a sua extensão, mas devido à elevada frequência, apesar de ser somente de 0,8 Hz, os parâmetros de carga máxima e mínima não são atingidos. Comprova-se que o sistema não tem tempo suficiente para encher o atuador até atingir os 10000 N nem tempo suficiente para atingir os 5000 N.

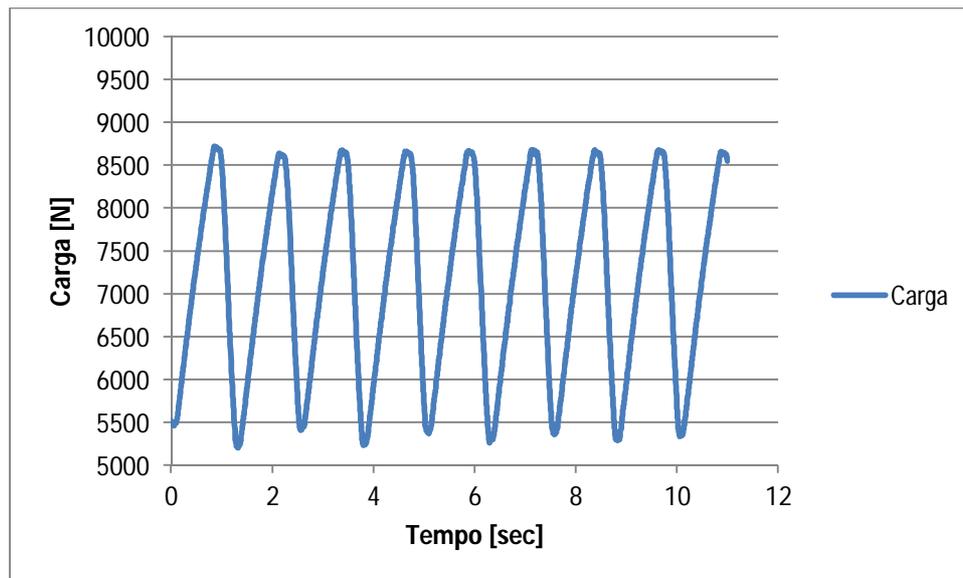


Figura. 5.5-Ensaio a [5000-10000]N; Frequência de teste 0,8 Hz; 90 mm; 50% *Duty cycle*

Estes são alguns dos critérios utilizados para a validação dos ensaios com os quais se construiu uma tabela com todos esses ensaios validados (Tabela geral de Validação de ensaio, Anexo E). Porém, para analisar com rigor todos estes ensaios é necessário estudar a influência de cada uma das variáveis no sistema para assim compreender o seu comportamento para as diversas situações.

## 5.2 Influência da frequência

Relativamente à frequência, serão analisadas várias questões, nomeadamente qual a maior frequência obtida nos ensaios para cada altura bem como identificar quais as condições necessárias para as obter. Será também abordada qual a influência do aumento e diminuição da frequência nos ensaios bem como alguns aspetos estatísticos para melhor avaliar as diversas frequências utilizadas para os ensaios.

A figura 5.6 apresenta um gráfico que traduz exatamente o que ocorre para a maioria dos ensaios para a mesma carga, à medida que a frequência aumenta, a carga deixa de atingir os valores de carga pré-estabelecidos. Tal deve-se principalmente ao caudal de ar admitido e retirado pelo controlador, bem como à frequência do sinal elétrico que é enviado para o controlador. Ou seja a partir de uma frequência de teste superior a 0,7 Hz, para uma carga de

[1000-5000]N este ensaio deixa de ser válido, apesar de o controlador permitir fornecer e retirar um caudal de 25 l/s não é suficiente para atingir os valores de carga.

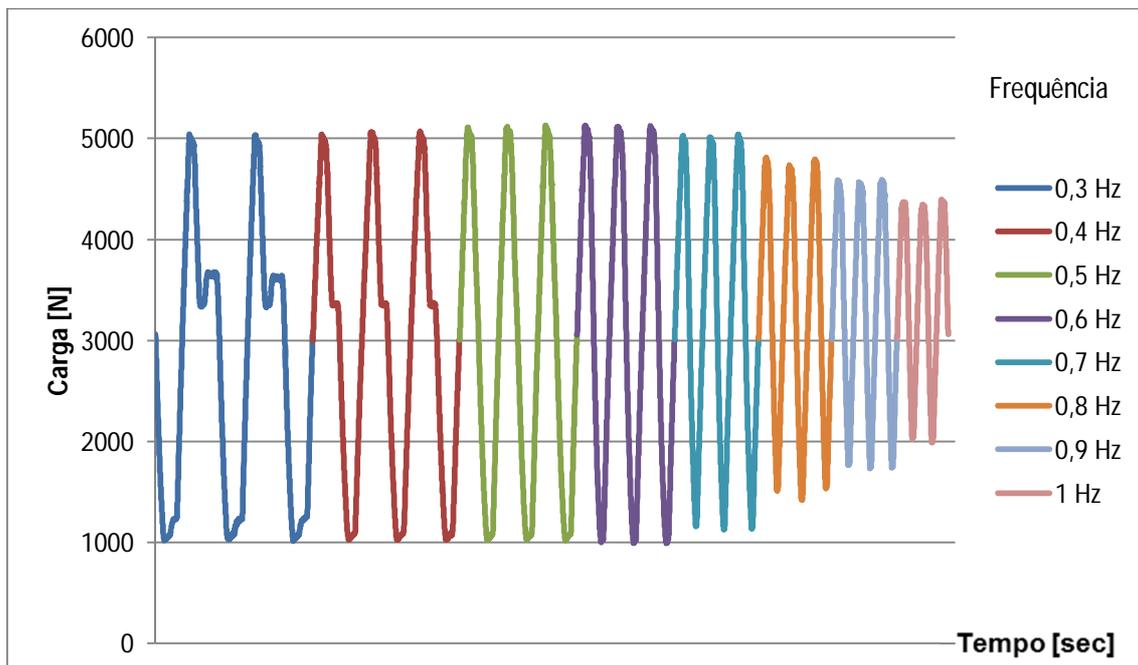


Figura. 5.6-Influência da frequência em ensaio a [1000-5000]N; 90 mm; 60% *Duty cycle*.

No entanto verifica-se precisamente o contrário para as frequências de 0,3 Hz e 0,4 Hz, em que os ensaios também não são validados, como se verifica no gráfico, a frequência é menor e o caudal o mesmo e os limites de carga são atingidos no entanto não há linearidade da carga.

Contudo, para alguns casos uma nova combinação do *duty cycle* permite a validação da frequência para o mesmo ensaio. Desta forma foram realizados diversos ensaios e apresentadas as condições ideais para cada frequência registada.

Estes gráficos disponíveis para consulta no Anexo G representam todas as combinações das variáveis que foram realizadas pelos diversos ensaios onde para o caso de estudo é fixada uma frequência e determinadas todas as restantes combinações de variáveis. A figura 5.7 apresenta um exemplo para a frequência de 1 Hz.

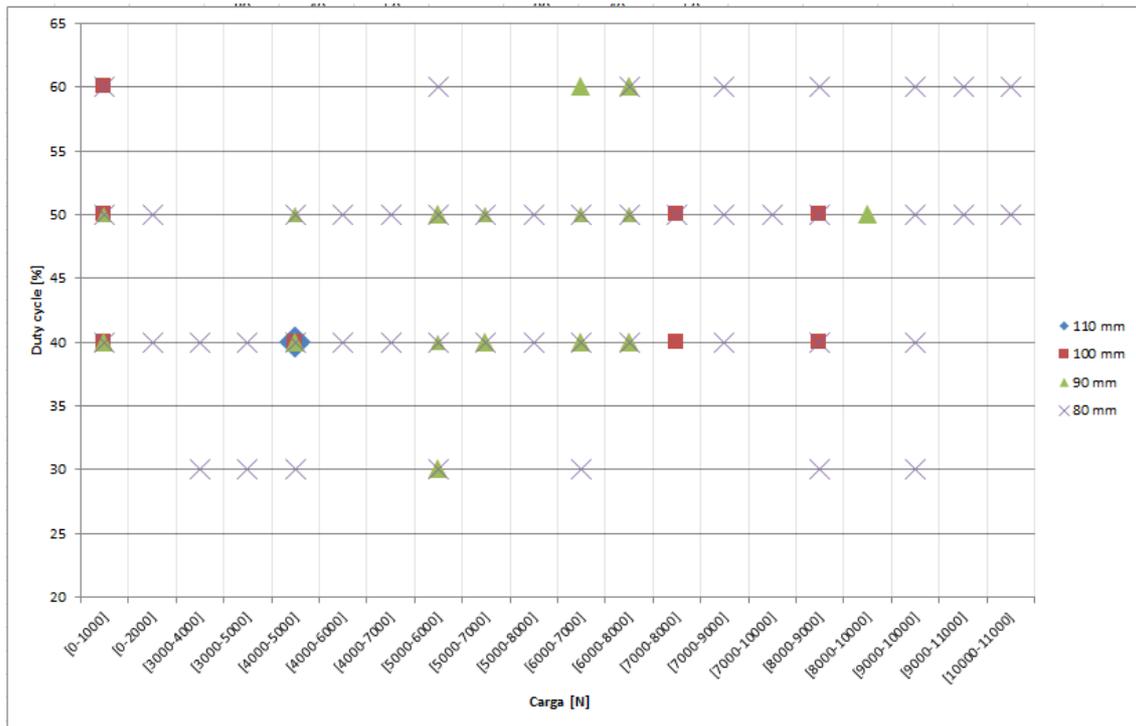


Figura. 5.7-Condições ideais para 1Hz.

Chega-se então à conclusão que para os ensaios de 1 Hz a altura ideal será de 80 mm, visto que há uma maior repetibilidade na linha do gráfico correspondente a este valor, e a melhor percentagem de *duty cycle* será de 40 ou 50%. Relativamente à carga aplicada, os valores obtidos são de baixas magnitudes sendo as máximas amplitudes registadas, 3000 N para as cargas [4000-7000]N, [5000-8000]N e [7000-10000]N.

Por sua vez todos estes valores foram tratados estatisticamente, e após este tratamento chegaram-se aos valores apresentados na tabela 5.1:

Tabela 5.1- Estatísticas de repetições.

Repetições	0,3Hz	0,4Hz	0,5Hz	0,6Hz	0,7Hz	0,8Hz	0,9Hz	1Hz	1,1Hz	1,2Hz	1,3Hz
80 mm	31	77	104	126	173	216	176	110	47	5	2
90 mm	26	71	105	123	134	156	119	61	16	2	0
100 mm	37	52	80	113	148	140	94	42	8	0	0
110 mm	31	42	56	69	101	93	51	16	1	0	0
Total	125	242	345	431	556	605	440	229	72	7	2
% Ensaios	4,1%	7,9%	11,3%	14,1%	18,2%	19,8%	14,4%	7,5%	2,4%	0,2%	0,1%

Relativamente às estatísticas apresentadas na tabela 5.1, é de salientar alguns valores, como seja a quantidade de ensaios validados para 0,8 Hz (605 ensaios) sendo este o maior número de ensaios atingidos em comparação com as outras frequências. No entanto, não é o máximo para as diferentes alturas, somente para as alturas de 80 mm e 90 mm do atuador. Para as alturas de 100 mm e 110 mm o máximo número de ensaios registados válidos é para uma frequência de 0,7 Hz. É possível de certa forma, afirmar que existe uma certa relação entre as várias variáveis, verificando com o aumento da altura uma diminuição do número de ensaios de um modo geral. Em relação ao aumento da frequência estes têm uma forma peculiar, aumentando o número de ensaios validados com o aumento da frequência até 0,7 Hz e 0,8 Hz, onde são registados o maior número de ensaios, cerca de 38%. Após esta situação, com o aumento da frequência obtém-se uma diminuição do número de ensaios validados. Desta forma, é possível concluir que as frequências mais fiáveis serão as de 0,7 Hz e 0,8 Hz visto que há um maior registo de ensaios, cerca de 38%.

No que respeita à frequência máxima atingida, foram nos ensaios a uma carga de [0-1000]N que se registaram os máximos para as várias alturas. Como revela a figura 5.8, as frequências têm de certa forma uma relação direta com a carga, onde se verifica que com o aumento da carga há uma diminuição da frequência máxima atingida. O mesmo acontece para todas as alturas, havendo também uma relação entre eles, onde com o aumento da altura do atuador há uma diminuição da frequência.

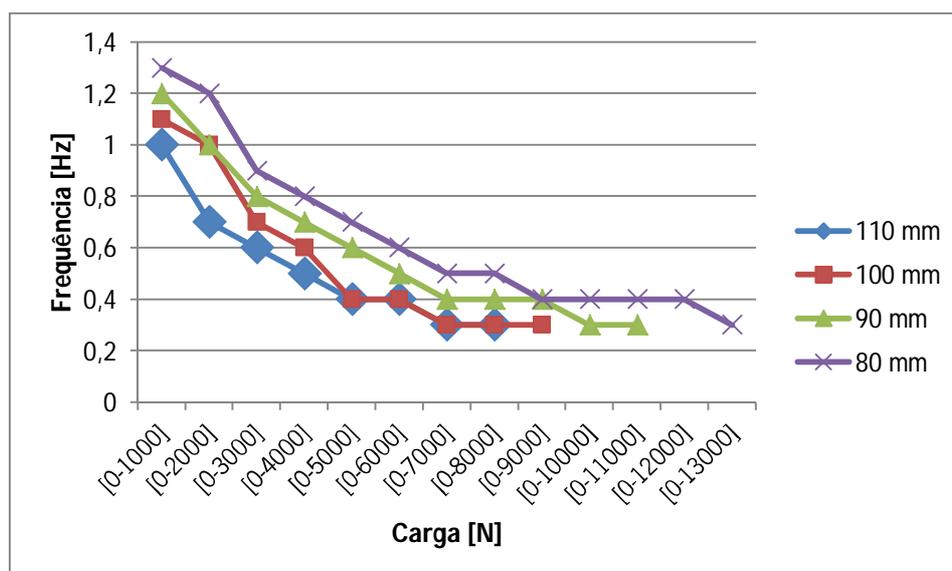


Figura. 5.8-Variação da frequência com a amplitude para várias alturas (Anexo F).

Este comportamento de diminuição da frequência traduz-se basicamente com o aumento do volume de ar do atuador, onde quanto maior for a altura do atuador e a amplitude, maior será o volume de ar a entrar e a sair do atuador, com este aumento de volume verifica-se sempre a diminuição da frequência.

### 5.3 Influência do *duty cycle*

A implementação do *duty cycle* tem como principal função alterar o tempo, em percentagem num período, ou seja, controlar o tempo que o atuador está a encher ou a esvaziar. Em geral este tipo de controlo tem mais utilidade para amplitudes mais elevadas onde é necessário haver um maior tempo de enchimento permitindo atingir cargas mais elevadas. A figura 5.9 apresenta a influência do *duty cycle* para um ensaio realizado a 0,6 Hz e a com cargas cíclicas de 1000 a 5000 N.

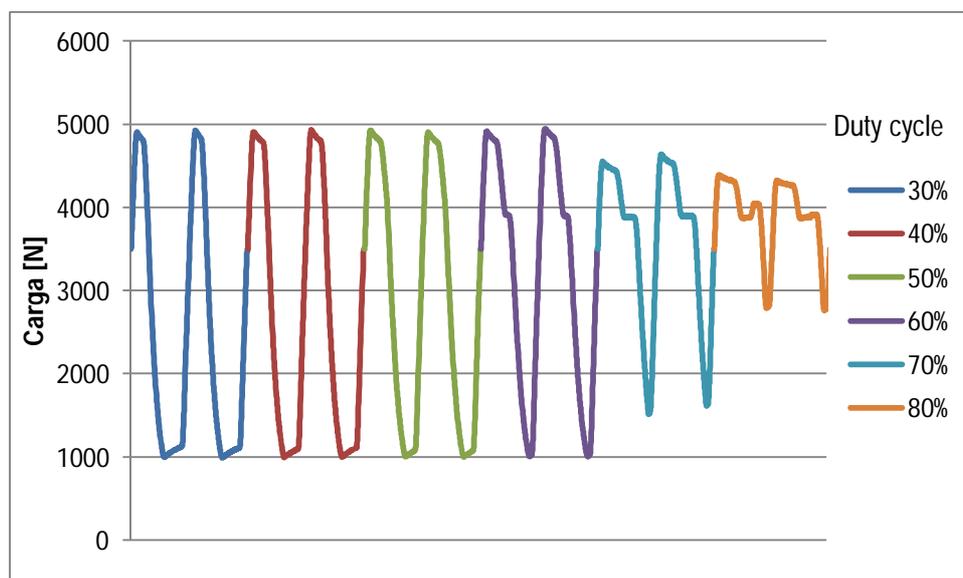


Figura. 5.9-Influência do aumento do *duty cycle* [1000-5000]N; Frequência de teste 0,6 Hz; 90 mm.

A variação da utilização do *duty cycle* depende do tipo de ensaio, consoante a sua amplitude e frequência, este pode ser ajustado de forma a ser possível realizar o ensaio pretendido. De acordo com o gráfico da figura 5.9 verifica-se que para este tipo de ensaios a variação do *duty cycle* é determinante, visto que ao aumentar este em demasia deixa de haver uma linearidade

na variação da carga e as cargas pré-estabelecidas não são atingidas. Como a amplitude entre as duas cargas é pequena, e o regulador debita apenas um caudal de 25 l/s, o tempo necessário para atingir a carga máxima é reduzido, o que significa que usar baixas percentagens de *duty cycle* é o mais vantajoso. Para os casos de utilização de um *duty cycle* demasiado elevado, ocorre a situação da inércia do sistema que provoca a não linearidade da carga máxima, não permanecendo à carga pretendida, com a tendência a estabilizar num valor de carga inferior. Como o aumento da percentagem de *duty cycle* o tempo de enchimento também aumenta, contudo o tempo de escape diminui. Como não há tempo suficiente para se dar o escape de todo o ar necessário para atingir a carga mínima então o seu valor começa a aumentar.

Em contrapartida, existem ensaios onde a utilização de *duty cycle* elevado é crucial geralmente para amplitudes elevadas onde é necessário mais tempo para atingir as cargas elevadas. Esta teoria é sustentada com base no caso apresentado em que se verifica que só para as percentagens de 70% e 80% é que é possível atingir a carga máxima pré-definida. A figura 5.10 apresenta a influência do *duty cycle* na amplitude de carga obtida.

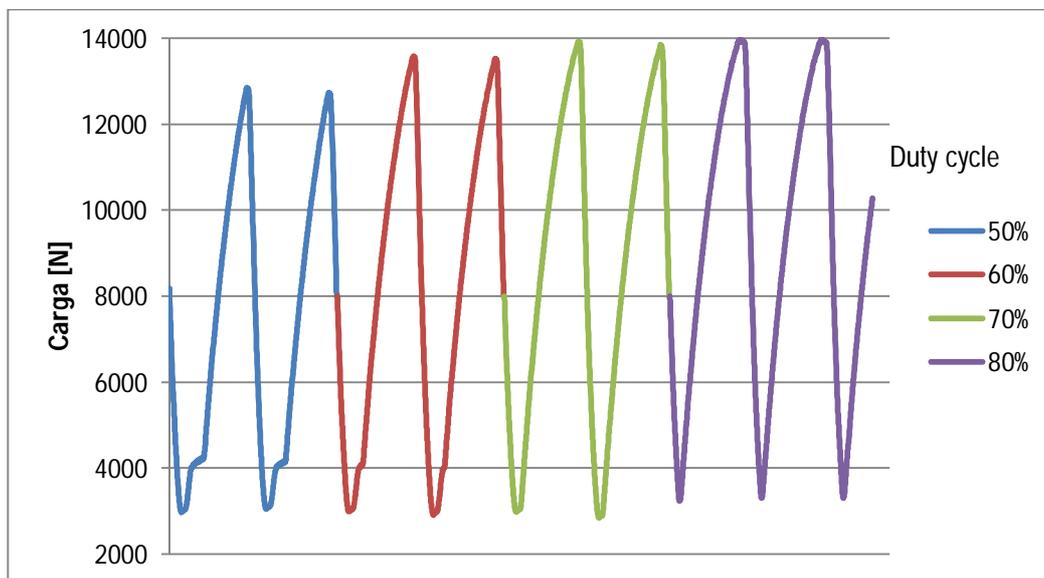


Figura. 5.10- Influência do aumento do *duty cycle* [3000-14000]N; Frequência de teste 0,4 Hz; 80 mm.

No entanto estes são casos extremos na utilização de um *duty cycle*, que apenas representam uma minoria dos ensaios. Para uma melhor análise da utilização dos diferentes *duty cycle* foi elaborada tabela 5.2:

Tabela 5.2- Estatísticas de repetições.

%	0,3Hz	0,4Hz	0,5Hz	0,6Hz	0,7Hz	0,8Hz	0,9Hz	1Hz	1,1Hz	1,2Hz	1,3Hz	Total
30	22	19	16	20	28	69	59	34	8	0	0	275
40	25	30	29	47	75	110	90	54	26	4	1	491
50	15	36	65	99	136	133	99	63	27	3	1	677
60	28	73	107	126	154	131	92	52	11	0	0	774
70	25	64	92	100	127	108	68	21	0	0	0	605
80	10	20	36	39	36	54	32	5	0	0	0	232

A tabela 5.2 representa o número de ensaios realizados distribuídos de forma a relacionar os diferentes *duty cycle* utilizados com as diferentes frequências. Verifica-se que os casos acima apresentados, as situações extremas constituem apenas uma pequena parte dos ensaios. Por fim foi possível constatar que o valor de *duty cycle* ideal seria de 60% uma vez que tem um maior número de repetições. Não sendo menos importantes os valores de 50% e 70% onde o número de repetições é também elevado.

#### 5.4 Inércia do sistema

Como a aplicação de carga é realizada por um sistema pneumático, estes tipos de forças de inércia estão sempre presentes devido ao seu difícil controlo e precisão. De forma a ter uma ideia das forças de inércia envolvidas nos ensaios, foram realizados alguns testes, na qual se verificou que o valor pode variar significativamente. As figuras 5.11 e 5.12 apresentam, respetivamente, a influência da inércia no sistema para as cargas máxima e mínima.

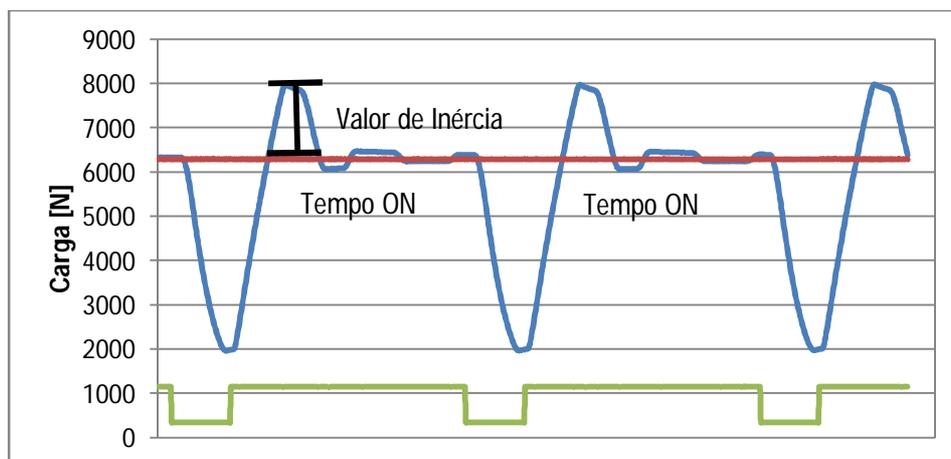


Figura. 5.11- Influência da inércia no sistema para carga máxima.

Estas situações ocorrem geralmente para um *duty cycle* elevado, numa situação comum a carga teria uma variação linear ao longo de toda a sua extensão, mas nestes casos como são atingidos os valores de carga pretendidos logo nos instantes iniciais apesar de o regulador estar a encher, a estabilização da carga dá-se para o valor de carga pré-definida. A carga corresponde a aproximadamente 6300 N, sendo a variação de carga acima deste valor o valor de inércia, que corresponde a cerca de 1700 N. Contudo é nos ensaios com elevada percentagem de *duty cycle* que se verificam valores de inércia significativos.

De forma a atenuar estas situações uma das soluções seria diminuir o valor de *duty cycle* ou aumentar a amplitude do ensaio permitindo haver uma maior amplitude de carga e tempo de enchimento.

Assim como existe um valor de inércia para quando o atuador está a encher, o mesmo acontece para quando o mesmo está a esvaziar.

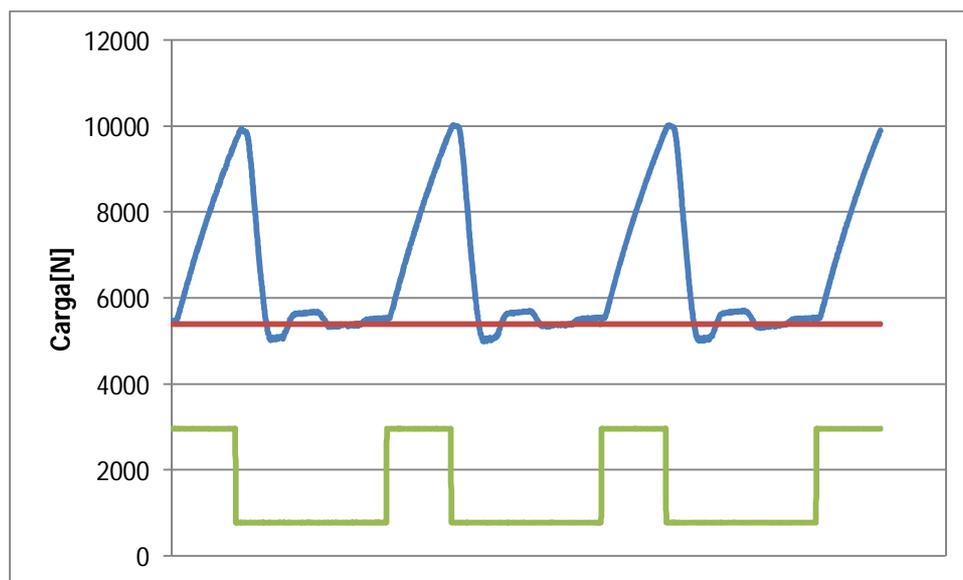


Figura. 5.12- Influência da inércia no sistema para carga mínima.

Durante o instante em que o atuador está a encher, é atingida a carga máxima, contudo durante o ciclo de escape é atingida a carga pretendida (5000 N) mas a carga tende a estabilizar para o valor de carga pré-definido, que corresponde a 5400 N. Verifica-se uma diferença 400 N do valor pretendido. Geralmente estes valores de inércia registados durante o processo de escape têm tendência a ocorrer para um *duty cycle* menor.

De igual forma que o caso anterior, para eliminar esta situação de estabilização da carga a solução passaria por aumentar a amplitude ou aumentar o *duty cycle*.

## 5.5 Influência da altura

Referente à influência da variação da altura na validação dos ensaios, foi realizada uma análise detalhada na qual se verificou que com a realização de ensaios com diferentes alturas, o número de ensaios validados era influenciado. Exemplo disso é representado no gráfico da figura 5.13, onde se verifica que com aumento da altura do atuador a diminuição do número de ensaio validados

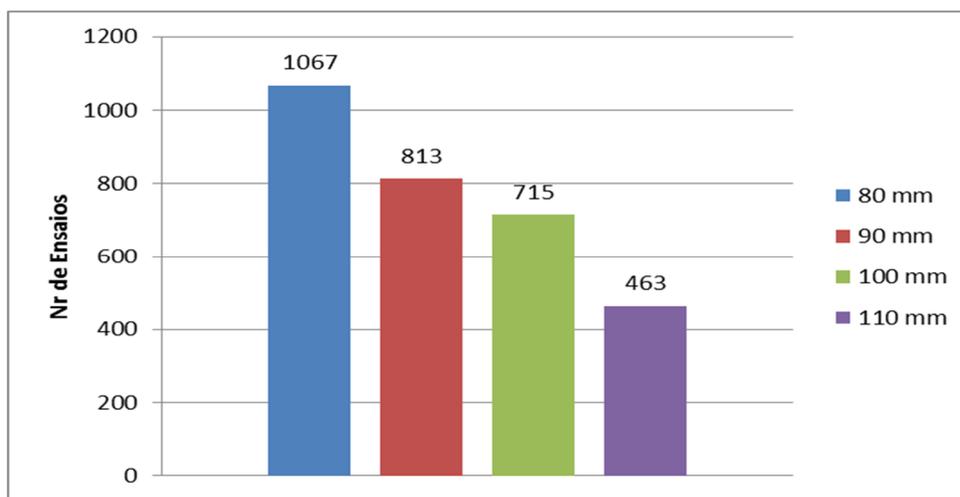


Figura. 5.13- Influência da altura no número de ensaios.

De tal forma é possível concluir que quanto menor for a altura de operação do atuador maior será a probabilidade de o ensaio ser validado, como representado no gráfico, o que de certa forma é aceitável uma vez que quanto maior for a altura maior será o volume de ar que será necessário encher/esvaziar, limitando também a possibilidade de realização de ensaios para uma maior frequência.

O mesmo ocorre para o aumento da amplitude, como é possível visualizar na figura 5.14. onde também o aumento da altura do atuador limita o número de ensaios validados, sendo para a mesma amplitude a altura preferível sempre a menor.

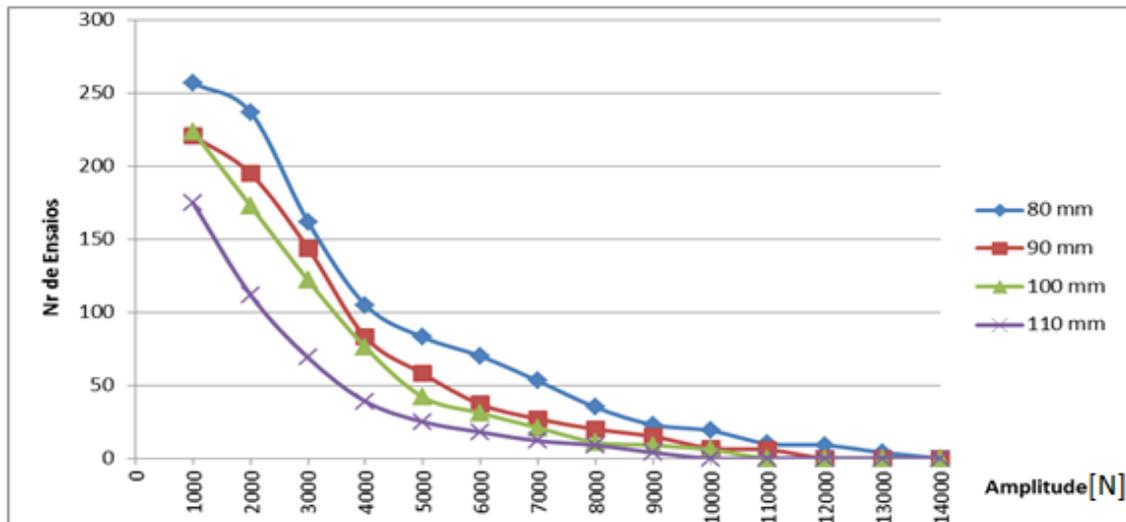


Figura. 5.14- Influência da altura na amplitude.

Assim é possível confirmar a ligação entre as várias variáveis do sistema, em que se verifica que com o aumento da amplitude e da altura o número de ensaios validados diminui, como representa o gráfico. Assim como já mencionado anteriormente o aumento da amplitude implica também uma diminuição da frequência máxima. Onde se verifica a unanimidade entre as várias variáveis.

No que respeita à carga máxima atingida foi realizado um teste para cada altura com um *duty cycle* a 100% para registar o seu valor máximo como representa a tabela 5.3.

Tabela 5.3

	Carga máxima [N]	Pressão máxima [bar]	Frequência máxima [Hz]
80 mm	13437,9	5,26	1,3
90 mm	13133,44	5,41	1,2
100 mm	12435,79	5,44	1,1
110 mm	11266,58	5,39	1,1

Na tabela regista-se que para a mesma pressão exercida pelo atuador para as diferentes alturas, a carga máxima diferente entre elas. E onde a máxima atingida foi de 13437 N para uma altura de 80 mm. Apesar de esta altura não ser a máxima atingida, visto que este ensaio foi realizado com um *duty cycle* de 100%, e onde a inércia do sistema não teve qualquer efeito com este valor. E verificando na figura 5.14 a existência de amplitudes com 14000 é prova disso, apesar de não ser possível chegar a este parâmetro com uma carga constante, com a aplicação de uma carga sinusoidal e com a contribuição da inércia é possível obter cargas de 14000N.

## 6 CONCLUSÕES E RECOMENDAÇÕES FUTURAS

O objetivo central desta dissertação foi em dar continuidade ao projeto para elaborar um forno para a obtenção de juntas de elevada resistência por um processo alternativo à soldadura por difusão. Este processo alternativo seria a soldadura por difusão sob pressão, onde o pretendido é a realização de ensaios com uma carga cíclica de 70 a 15000N para uma frequência de 0,5 a 5Hz.

### 6.1 Sumário dos desenvolvimentos

Inicialmente para compreender e entender melhor o funcionamento e o processo de realização de juntas de elevada resistência através da soldadura por difusão sob pressão foi feita uma pesquisa bibliográfica, testado o sistema de aplicação de carga bem como desenvolvido um programa para a realização e controlo dos ensaios. Após alguns ensaios verificou-se que o sistema apresentava algumas anomalias em relação à segurança para com o utilizador bem como para a qualidade dos ensaios. Então para as eliminar foram desenvolvidos uns apoios que permitiram dar a segurança desejada assim como a fiabilidade dos ensaios. E com estas anomalias eliminadas foram realizados ensaios sistemáticos para determinar os limites de operação do sistema.

Dado que já existia um programa para a realização dos ensaios, foi feito ao mesmo um *upgrade* para ser mais fácil de interagir bem como para ter um maior controlo sobre os ensaios.

Após estas modificações foram então iniciados os ensaios sistemáticos para determinar as limitações do sistema, sendo elas apresentadas em seguida.

Uma das limitações determinada inicialmente foi a pressão da rede, onde os valores desta poderia variar entre os 5,26 a 5,44 bar o que de certa forma influencia a carga máxima atingida, a que se viria a verificar ser de 13437,9 N, para uma pressão de 5,26 bar e com o atuador a 80 mm de altura. O mesmo acontece para as restantes alturas do atuador, onde para uma altura de

90 mm corresponde uma carga máxima de 13133,44 N e uma pressão de 5,41 bar, para 100 mm uma carga de 12435,79 N e uma pressão de 5,44 bar, e para 110 mm uma carga de 11266,58 N para uma pressão de 5,39 bar. Este teste é realizado para um *duty cycle* de 100% onde não existe a influência da inércia do sistema, em que em alguns ensaios que a carga máxima atingida e com a ajuda da inércia do sistema é superior.

Relativamente à gama de frequência o máximo atingido durante os ensaios foi de 1.3 Hz para uma altura de 80 mm, muito distante dos 5 Hz pretendidos. Esta limitação da frequência deve-se basicamente às limitações do caudal do regulador, onde os 25 l/s que ele debita não são suficientes para a obtenção de frequências superiores. Para as restantes alturas as suas frequências máximas atingidas são, para 90 mm 1,2 Hz, 100 mm para 1,1 Hz e para 110 mm foi 1Hz. Também se verificou que todas as frequências foram atingidas no ensaio com cargas entre 0 e 1000 N onde a amplitude é menor.

Após a análise dos valores e ensaios registados são apresentados os ensaios com amplitudes máximas, são eles:

- 0-13000 N; 0,3 Hz; *Duty cycle* de 50, 60% para uma altura de 80 mm;
- 1000-14000 N; 0,3 Hz; *Duty cycle* de 60, 70% para uma altura de 80 mm;
- 0-11000 N; 0,3 Hz; *Duty cycle* de 60, 70% para uma altura de 90 mm;
- 1000-12000 N; 0,3 Hz; *Duty cycle* de 60, 70% para uma altura de 90 mm;
- 2000-13000 N; 0,3 Hz; *Duty cycle* de 60, 70% para uma altura de 90 mm;
- 1000-11000 N; 0,3 Hz; *Duty cycle* de 60, 70% para uma altura de 100 mm;
- 2000-12000 N; 0,3 Hz; *Duty cycle* de 60, 70, 80% para uma altura de 100 mm;
- 1000-10000 N; 0,3 Hz; *Duty cycle* de 60, 70% para uma altura de 110 mm;
- 2000-11000 N; 0,3 Hz; *Duty cycle* de 60, 70% para uma altura de 110 mm;

Por fim é possível concluir que, para os ensaios realizados as condições ideais, ou seja, de obter um bom ensaio seria a realização de ensaios com um *duty cycle* de 60, 70% para uma altura de 80 mm com uma frequência de 0.7, 0.8 Hz, onde se verificaram estas serem as variáveis mais fiáveis.

Estas são as principais razões de limitação do sistema, no entanto existem outras que limitam de certa forma a validação dos ensaios, como o caso da inércia do sistema, presente devido ao sistema de aplicação de força ser pneumático e o que dificulta a exatidão da carga pretendida.

## 6.2 Recomendações futuras

No decorrer deste trabalho surgiram algumas recomendações para melhorar o projecto atual, tais como:

Relativamente ao sistema de aplicação de carga cíclica do forno de soldadura por difusão sob pressão:

- Realização de ensaios com menor altura de operação do atuador de membrana pneumático.
- Utilizar um controlador electropneumático que permita regular um caudal superior ao que foi utilizado, nomeadamente o ITV3000, em que já é possível regular um caudal de 4000 l/min.
- Implementar o sistema numa rede pneumática com pressão de ar mais regular.
- Como a pressão da rede apresentava algumas irregularidades, alguns valores de conversão de unidades podem sofrer algumas alterações. Verificar assim se é necessário alterar os valores já determinados (Anexo I).

Adicionalmente, prevê-se implementar os restantes sistemas do forno de soldadura por difusão sob pressão, tais como:

- Sistema de arrefecimento
- Sistema de aquecimento
- Sistema de vácuo
- Aquisição de dados



## BIBLIOGRAFIA

- Al-Janabi, D., Kadhim, D., & Al- Az, D. (March de 2009). Effect of the Diffusion Bonding Conditions. *in Journal of Engineering and Development, Vol. 13, No. 1.*
- Almeida, J. A. (2008). *Modelação Numérica do Processo de Soldadura por Difusão.*
- Andrzejewski, H., Badawi, K., & Rolland, B. (September de 1993). The Roughness in the Diffusion Welding. *in Welding Reserch.*
- António Valadão Cardoso. (2005). *Ciência dos Materiais Multimídia.* Obtido em 29 de Novembro de 2013, de Laboratório de Material Didático Multimídia: <http://www.cienciadosmateriais.org/index.php?acao=exibir&cap=22>
- Bagnato, O. R. (2002). *Propriedades Mecânicas de Juntas ALSi12 / Al2O3 Soladas por Difusão.* Tese de Doutorado: Universidade Estadual de Campinas.
- Camargo, P. R. (1990). *Estudo comparativo entre os processos de Brasagem e Difusão com interface líquida para a realização de junções entre Titânio e aço Inox 304l.* Universidade Estadual de Campinas: Tese de Mestrado.
- Coppens, Kourosch Malek , & Marc-Olivier. (2001). Effects of Surface Roughness on Self- and Transport Diffusion in Porous Media.
- Corporation, S. E. (2009). *Capacitive Discharge, Fine-Spot Resistance Welder.* Obtido de <http://www.sunstoneengineering.com/site/pages/dpInstructions>
- Festo. (2011). Obtido em 5 de Junho de 2013, de [http://xdki.festo.com/xdki/data/doc\\_ENUS/PDF/US/EB-EBS\\_ENUS.PDF](http://xdki.festo.com/xdki/data/doc_ENUS/PDF/US/EB-EBS_ENUS.PDF)
- Higashi, H., & Kenji. (2003). The Optimal Surface Roughness Condition on Diffusion Bonding. *in Materials Transactions, Vol. 44, No. 8 (2003) pp. 1640 to 1643.*

---

Mahoney, M. W. , & Bampton, C.C. (1993). *ASM Handbook, Vol 6, Welding, Brazing and Soldering*. American Society for Metals.

Myothitsan. (6 de Outubro de 2012). Obtido de <http://myothitsan.files.wordpress.com/2012/10/diffusion-welding.pdf>

Patricio F.Mendes, & Thomas W.Eagar. (May de 2001). Welding processes for Aeronautics. *in Advances Materials & Processes*.

Seabra, E., Silva, L. F., Guedes, A., & Barbosa, J. (2009). Projecto Mecatrónico de um Forno de Vazio para Soldadura por Pressuring Diffusion Welding. *in FIMEC'2009*.

Shirzadi, H. Assadi, & Wallach, E. (6 de December de 2000). Interface evolution and bond strength when diffusion. *in Surface and Interface Analysis*.

SMC. (2011). Obtido em 5 de Junho de 2013, de [https://content2.smcetech.com/pdf/ITV-F\\_EU.pdf](https://content2.smcetech.com/pdf/ITV-F_EU.pdf)

William D.Callister, J. (2006). *Fundamentos da Ciência e Engenharia de Materiais, Uma abordagem Integrada, Segunda Edição*.

Yuan, X.J., Sheng, G.M., Qin, B., Huang, W.Z., & Zho. (2008). Impulse pressuring diffusion bonding of titanium alloy to stainless steel. *in Materials Characterization 59 (2008) 930-936*.

## **ANEXOS**



## Anexo A – Catálogo da Festo

### Cilindros de fuelle EB

Hoja de datos

FESTO

Función



- Diámetro  
145 ... 385 mm
- Carrera  
60 ... 230 mm



Datos técnicos generales						
Tamaño	145	165	215	250	325	385
Conexión neumática	G $\frac{1}{8}$	G $\frac{1}{4}$	G $\frac{3}{4}$	G $\frac{3}{4}$	G $\frac{1}{4}$	G $\frac{1}{4}$
Funcionamiento	Simple efecto					
Construcción	Fuelle redondo					
Tipo de fijación	Con rosca interior					
Posición de montaje	Indistinta					

Condiciones de funcionamiento y del entorno	
Fluido	Aire comprimido filtrado, lubricado o sin lubricar
Presión de funcionamiento [bar]	0 ... 8
Temperatura ambiente [°C]	-40 ... +70
Clase de resistencia a la corrosión <sup>1)</sup>	2

- 1) Clase de resistencia a la corrosión 2 según norma de Festo 940 070  
Válida para piezas expuestas a gran peligro de corrosión. Piezas exteriores en contacto directo con sustancias usuales en entornos industriales, tales como disolventes, detergentes o lubricantes, con superficies principalmente decorativas

Fuerzas [N]						
Tamaño	145	165	215	250	325	385
Cilindro de fuelle simple						
Relación fuerza/carrera	→ 4		→ 5			
Fuerza de reposición	200				300	
Cilindro de fuelle doble						
Relación fuerza/carrera	→ 6		→ 7			
Fuerza de reposición	200				300	

Importante			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• Los cilindros de fuelle únicamente deben avanzar hasta topar con una pieza; de lo contrario, deben estar provistos de topes en los finales de carrera, ya que de no ser así, la carga aplicada sobre el material de</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• fuelle sería demasiado grande</li> <li>• Para conseguir comprimir el cilindro elástico al máximo es necesario aplicar una fuerza de recuperación. En general, basta con el peso de la propia pieza desplazada</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La fuerza debe aplicarse en toda la superficie de la placa superior e inferior</li> <li>• Antes de desmontar los cilindros de fuelle, es necesario purgar el aire</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• La goma de los cilindros de fuelle no debe topar con otras piezas al estar en funcionamiento</li> </ul>

# Cilindros de fuelle EB

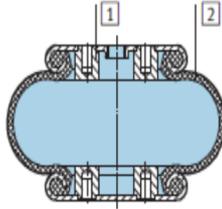


Hoja de datos

Pesos [g]						
Tamaño	145	165	215	250	325	385
Cilindro de fuelle simple	900	1 200	2 000	2 300	4 100	5 800
Cilindro de fuelle doble	1 100	1 500	2 300	3 000	4 800	6 900

## Materiales

Vista en sección

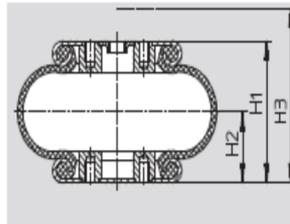


Cilindros de fuelle	
1	Cuerpo Acero cincado
2	Fuelle Goma
-	Materiales Sin cobre, PTFE ni silicona
-	Conformidad con RoHS

## Fuerza de avance $F_y$ y volumen del fuelle $V$ en función de la altura mínima $H_2$ necesaria para el montaje + carrera

El diagrama muestra el cambio de la fuerza de empuje  $F$  aplicando diversas presiones de funcionamiento y, además, el cambio del volumen  $V$  del fuelle. En ambos casos el cambio se

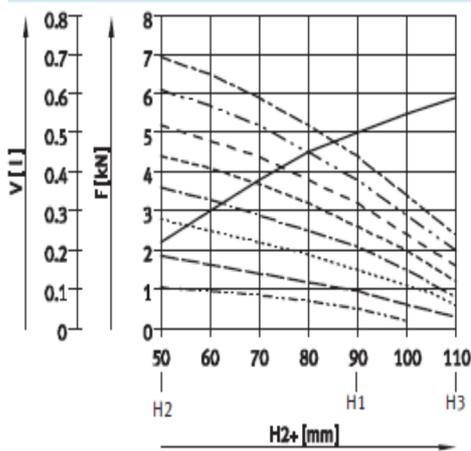
muestra en función de la carrera del cilindro. Para aprovechar las fuerzas al máximo es indispensable respetar la altura mínima de montaje  $H_2$ .



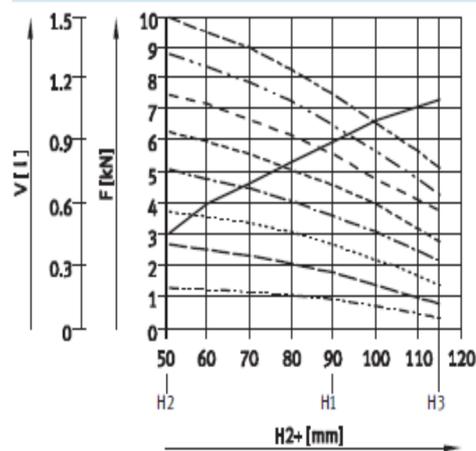
- H1 Altura de trabajo recomendada con amortiguación a 6 bar
- H2 Altura mínima para el montaje
- H3 Altura máxima con el fuelle extendido

## Cilindro de fuelle simple

EB-145-60



EB-165-65



+ Añadir carrera

- |              |             |             |
|--------------|-------------|-------------|
| ———— Volumen | ..... 3 bar | ----- 6 bar |
| ----- 1 bar  | ----- 4 bar | ----- 7 bar |
| ----- 2 bar  | ----- 5 bar | ----- 8 bar |

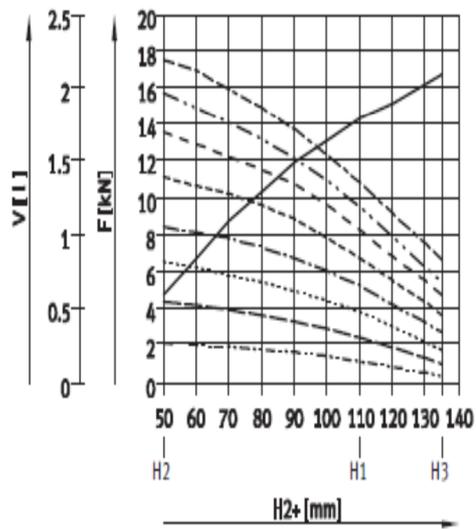
# Cilindros de fuelle EB



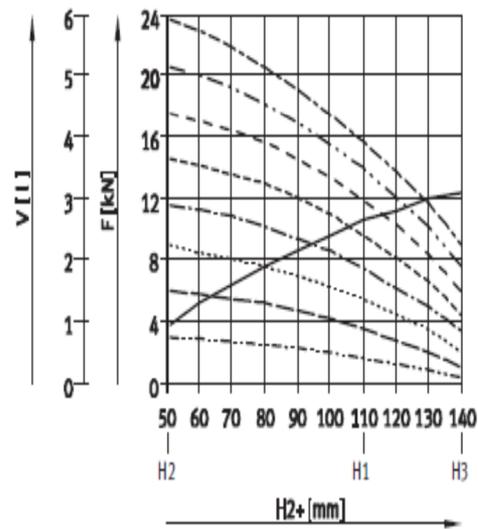
Hoja de datos

## Cilindro de fuelle simple

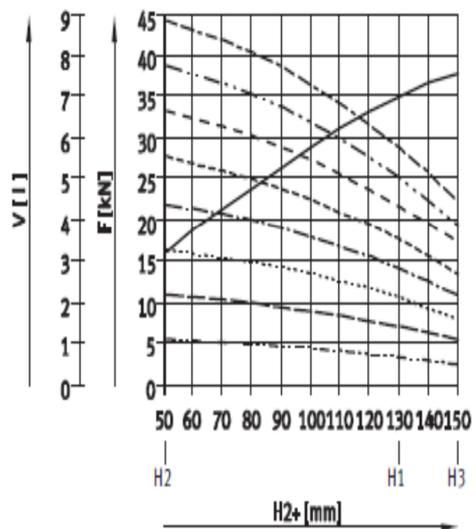
EB-215-80



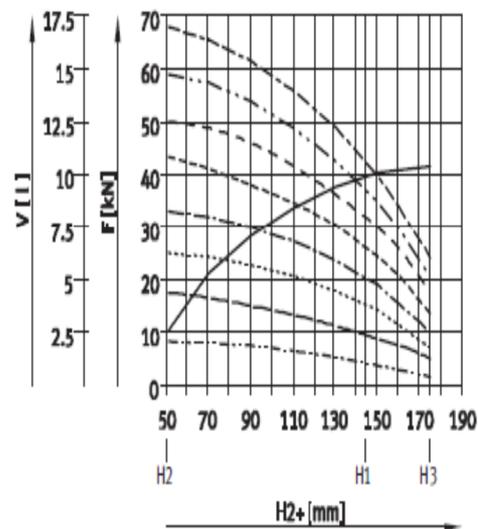
EB-250-85



EB-325-95



EB-385-115



+ Añadir carrera

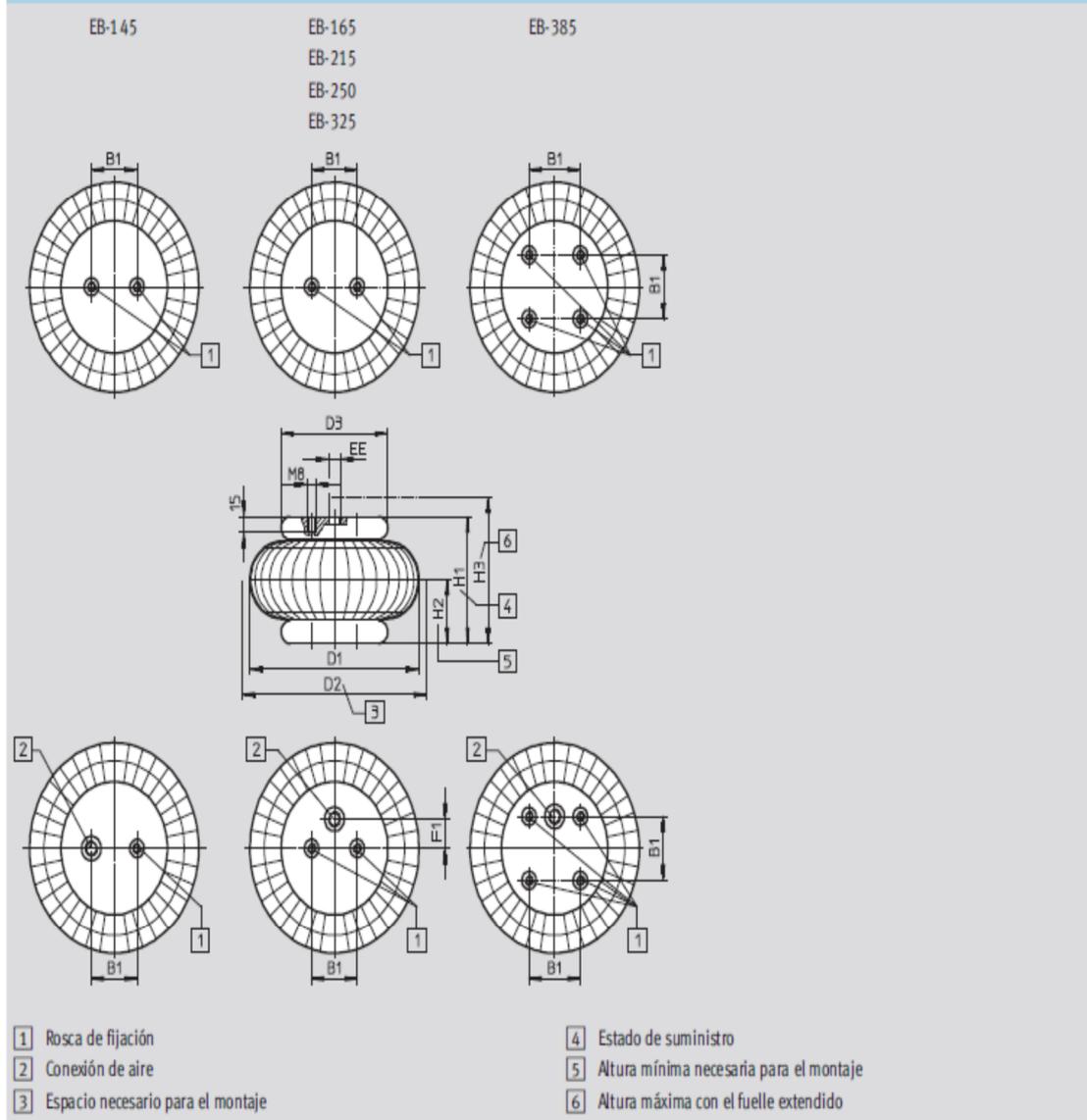
- |              |             |             |
|--------------|-------------|-------------|
| ———— Volumen | ..... 3 bar | ----- 6 bar |
| ----- 1 bar  | ----- 4 bar | ----- 7 bar |
| ----- 2 bar  | ----- 5 bar | ----- 8 bar |

# Cilindros de fuelle EB

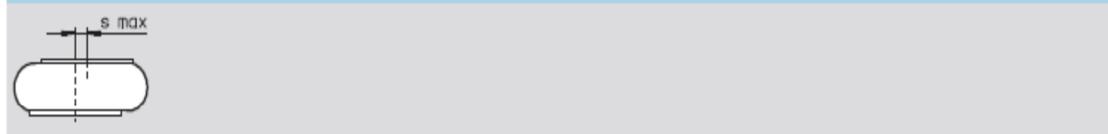
Hoja de datos



Dimensiones: cilindro de fuelle simple Datos CAD disponibles en [www.festo.com](http://www.festo.com)



## Desfase máximo entre las superficies de fijación



**Importante**

Los cilindros de fuelle pueden ejecutar un movimiento a lo largo de un ángulo de inclinación. Deberá tenerse cuidado en no exceder dicho ángulo  $\alpha$ . Además, deberá ponerse cuidado en que los movimientos del cilindro de fuelle nunca tengan una altura inferior a la altura mínima admisible H2 ni que superen la altura máxima H3. El centro X de la placa es el punto de referencia para calcular la fuerza de empuje necesaria.

## Cilindros de fuelle EB

**FESTO**

Hoja de datos

Tipo	B1 ±0,2	D1 ∅ máx.	D2 ∅	D3 ∅	EE	F1 ±0,2	H1	H2 mín.	H3 máx.	S <sub>máx</sub>	Ángulo de giro α máx.
EB-145-60	20	145	160	90	G $\frac{1}{8}$	-	90	50	110	10	20°
EB-165-65	44,5	165	180	108	G $\frac{1}{4}$	0	90	51	115	10	20°
EB-215-80	70	215	230	141	G $\frac{3}{4}$	0	110	50	135	10	20°
EB-250-85	89	250	265	161	G $\frac{3}{4}$	38,1	110	51	140	10	20°
EB-325-95	157,5	325	340	228	G $\frac{1}{4}$	73	130	51	150	10	15°
EB-385-115	158,8	385	400	287	G $\frac{1}{4}$	79,4	145	51	175	10	15°

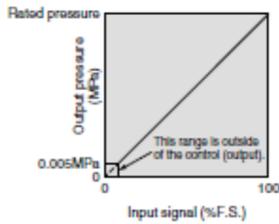
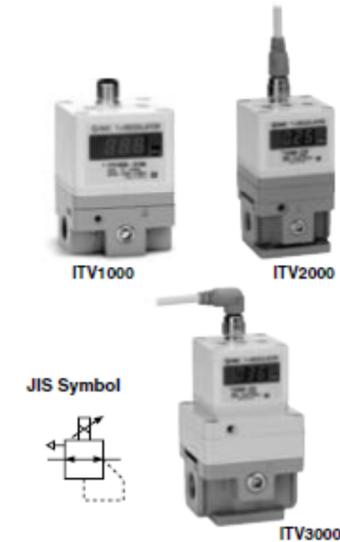
Referencias: cilindro de fuelle simple			
Tamaño	Carrera [mm]	N° art.	Tipo
145	60	36 486	EB-145-60
165	65	36 487	EB-165-65
215	80	36 488	EB-215-80
250	85	36 489	EB-250-85
325	95	193 788	EB-325-95
385	115	193 789	EB-385-115



Anexo B – Catálogo da SMC

# Electro-Pneumatic Regulator Series **ITV1000/2000/3000**

## Standard Specifications



Graph (1) Input/output characteristics chart

Model	ITV101	ITV103	ITV105	
	ITV201	ITV203	ITV205	
		ITV301	ITV303	ITV305
Minimum supply pressure	Set pressure +0.1 MPa			
Maximum supply pressure	0.2 MPa			
Set pressure range <sup>Note 1)</sup>	0.005 to 0.1 MPa	0.005 to 0.5 MPa	0.005 to 0.9 MPa	
Power supply	Voltage	24 VDC ± 10%, 12 to 15 VDC		
	Current consumption	Power supply voltage 24 VDC type: 0.12 A or less Power supply voltage 12 to 15 VDC type: 0.18 A or less		
Input signal	Current type <sup>Note 2)</sup>	4 to 20 mA, 0 to 20 mA (Sink type)		
	Voltage type	0 to 5 VDC, 0 to 10 VDC		
Input Impedance	Preset input	4 points		
	Current type	250 Ω or less		
	Voltage type	Approx. 6.5 kΩ		
Output signal <sup>Note 3)</sup> (monitor output)	Analog output	1 to 5 VDC (Load impedance: 1 kΩ or more) 4 to 20 mA (Sink type) (Load impedance: 250 Ω or less) Output accuracy within ±6% (full span)		
	Switch output	NPN open collector output: Max. 30 V, 30 mA PNP open collector output: Max. 30 mA		
Linearity	Within ±1% (full span)			
Hysteresis	Within 0.5% (full span)			
Repeatability	Within ±0.5% (full span)			
Sensitivity	Within 0.2% (full span)			
Temperature characteristics	Within ±0.12% (full span)/°C			
Output pressure display <sup>Note 4)</sup>	Accuracy	±3% (full span)		
	Minimum unit	MPa: 0.01, kgf/cm <sup>2</sup> : 0.01, bar: 0.01, psi: 0.1 <sup>Note 5)</sup> kPa: 1		
Ambient and fluid temperature	0 to 50°C (No condensation)			
Enclosure	Equivalent to IP65			
Mass	ITV10	Approx. 250 g (without options)		
	ITV20	Approx. 350 g (without options)		
	ITV30	Approx. 645 g (without options)		

- Note 1) Please refer to graph 1, relation to the differences between the set pressure and input. Additionally, refer to page 668 as maximum set pressure differs on unit of standard measure.  
 Note 2) 2-wire type 4 to 20 mA is not available. Power supply voltage (24 VDC or 12 to 15 VDC) is required.  
 Note 3) Select either analog output or switch output. Further, when switch output is selected, select either NPN output or PNP output.  
 Note 4) Values can be adjusted starting from the minimum output pressure display units (ex. 0.01 to 0.50 MPa) are used for the zero/span adjustment or the preset input type adjustment. Units are not interchangeable.  
 Note 5) The minimum unit for the 0.9 MPa (130 psi) type is 1 psi.  
 Note 6) The above characteristics are confirmed to the static state. When air is consumed on the output side, the pressure may fluctuate.

## How to Order

**ITV 3 0 1 0 - 0 1 2 S - - -**

**Model**

1	1000 type
2	2000 type
3	3000 type

**Pressure range**

1	0.1 MPa
3	0.5 MPa
5	0.9 MPa

**Power supply voltage**

0	24 VDC
1	12 to 15 VDC

**Input signal**

0	Current 4 to 20 mA (Sink type)
1	Current 0 to 20 mA (Sink type)
2	Voltage 0 to 5 VDC
3	Voltage 0 to 10 VDC
4*	Preset Input

**Monitor output**

0*	None (for preset input)
1	Analog output 1 to 5V DC
2*	Switch output/NPN output
3*	Switch output/PNP output
4*	Analog output 4 to 20 mA (Sink type)

**Thread type**

Nil	Rc
N	NPT
T	NPTF
F	G

**Port size**

1	1/8 (1000 type)
2	1/4 (1000, 2000, 3000 type)
3	3/8 (2000, 3000 type)
4	1/2 (3000 type)

**Pressure display unit**

Nil	MPa
2 <sup>Note 1)</sup>	kgf/cm <sup>2</sup>
3	bar
4 <sup>Note 1)</sup>	psi
5	kPa

**Cable connector type**

S	Straight type 3 m
L	Right angle type 3 m
N	Without cable connector

**Bracket**

Nil	Without bracket
B	Flat bracket
C	L-bracket

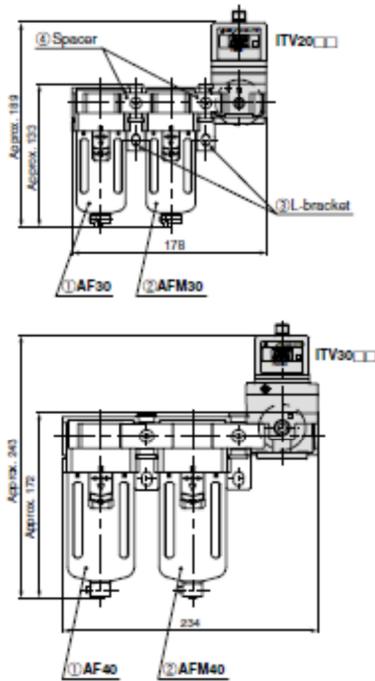
**CE compliance**

Nil	Not compliant
Q	Compliant

Note 1) Refer to pages 663, 664 and 665 for CE marked products in the Made to Order specifications.  
\* Please visit our SMC homepage: <http://www.smccworld.com> for the latest details on our CE compliant products.

**Made to Order**  
Refer to pages 663, 664 and 665 for details.

## Electro-Pneumatic Regulator *Series ITV1000/2000/3000*



### Combinations

○ Standard specifications    ◯ Combination possible    ◻ Combination not possible

\* ITV1000 models are not applicable.

Specifications	Symbol	Applicable model	
		ITV2000	ITV3000
Standard specifications	Set pressure max. 0.1 MPa	1	○
	Set pressure max. 0.5 MPa	3	○
	Set pressure max. 0.9 MPa	5	○
	Connection Rc 1/4	02	○
	Connection Rc 3/8	03	○
	Connection Rc 1/2	04	○
Accessories	Bracket	B	○
	Bracket	C	○
Optional specifications	Connection NPT1/4	N02	○
	Connection NPT3/8	N03	○
	Connection NPT1/2	N04	○
	Connection G 1/4	F02	○
	Connection G 3/8	F03	○
	Connection G 1/2	F04	○

### Modular Products and Accessory Combinations

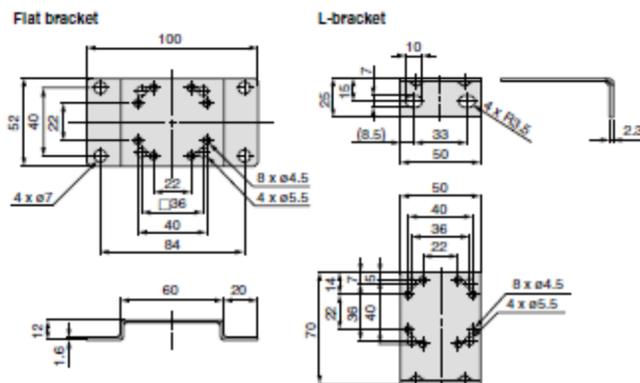
\* ITV1000 models are not applicable.

Applicable products and accessories	Applicable model	
	ITV2000	ITV3000
① Air filter	AF30	AF40
② Mist separator	AFM30	AFM40
③ L-bracket	B310L	B410L
④ Spacer	Y30	Y40
⑤ Spacer with L-bracket (③ + ④)	Y30L	Y40L

### Accessory (Option)/Part No.

Description	Part No.		
	ITV1000	ITV2000	ITV3000
Flat bracket	P3020114 (Mounting thread is not included.)		
L-bracket	INI-398-0-6 (Mounting thread is not included.)		
Cable connector	Straight type 3 m		
	Right angle type 3 m		

### Dimensions



### Made to Order

(Refer to pages 664 and 665 for details.)

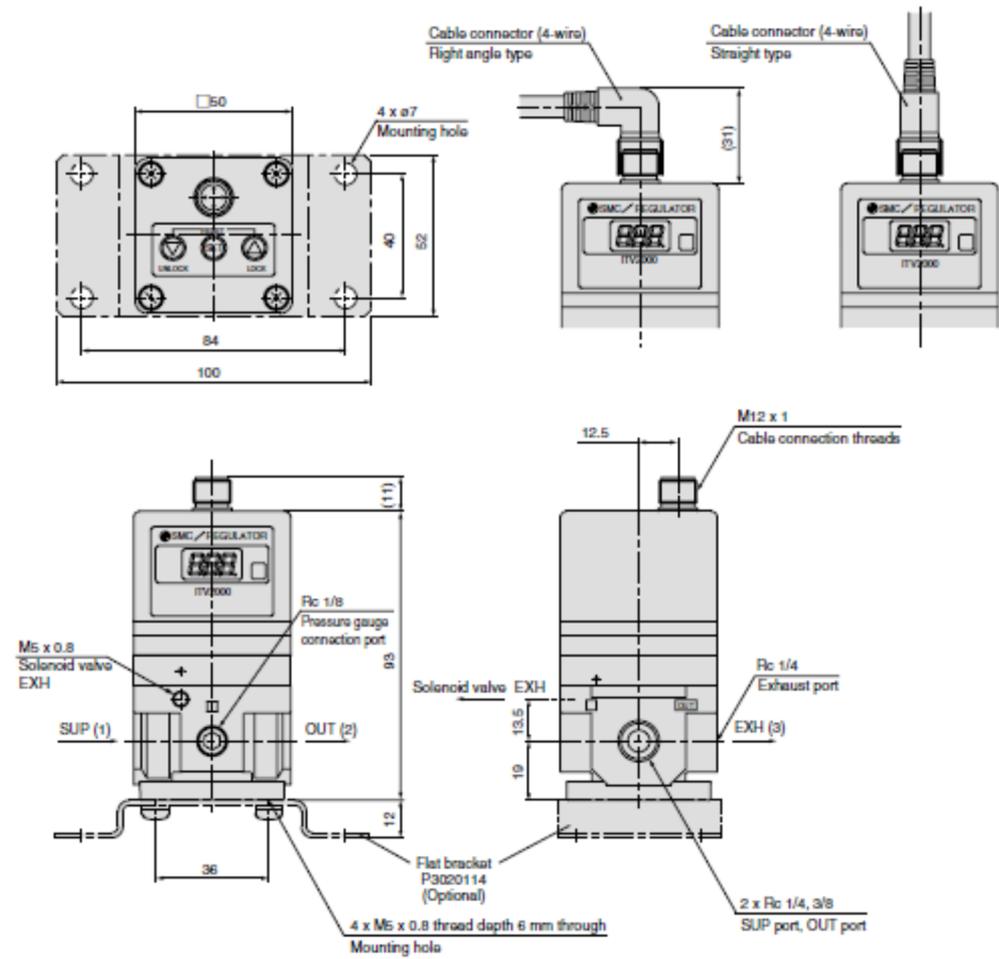
Symbol	CE-compliant	Specifications
X80	Not compliant	DeviceNet compliant
X155	Compliant	
X300	Not compliant	CC-Link compliant
X305	Compliant	
X310	Not compliant	RS-232C compliant
-	Compliant	
X81	Not compliant	16 points preset input type
X156	Compliant	
X93	Not compliant	Digital input type
X157	Compliant	
X102	Not compliant	Reverse type
X321	Compliant	
X224	Not compliant	High pressure type (SUP 1.2 MPa, OUT 1.0 MPa)
X322	Compliant	
X25	Not compliant	Set pressure range 1 to 100 kPa (Except Series ITV3000)
X323	Compliant	
X88	Not compliant	High speed response type (Except Series ITV3000)
X154	Compliant	
X26	Not compliant	For manifold mounting (Except Series ITV3000)
X153	Compliant	

Note 1) Manifolds are compatible with 2 to 8 stations. Consult with SMC for 9 stations or more.  
 Note 2) Products without symbols are also compatible. Consult with SMC separately.

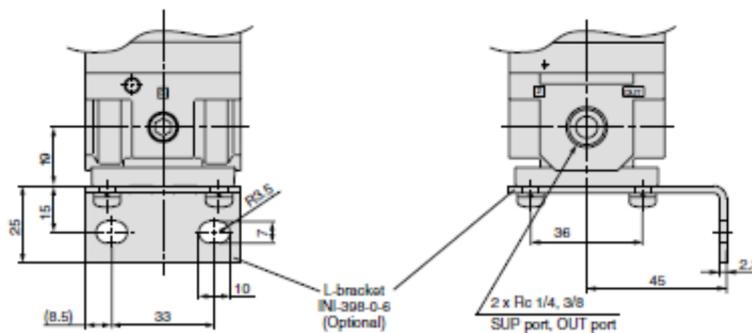
**Dimensions**

**ITV20□□  
Flat bracket**

Note) Do not attempt to rotate, as the cable connector does not turn.



**L-bracket**





## Anexo C – Condicionador de sinal

### Model SGA Amplifier / Conditioner



- User selectable analog output  $\pm 10V$ ,  $\pm 5V$ ,  $0-10V$ ,  $0-5V$ ,  $0-20mA$ ,  $4-20mA$
- 110 VAC, 220 VAC OR 18-28 VDC power
- Switch selectable filtering 1 Hz to 5 kHz
- Single channel powers up to 4 transducers
- Selectable full scale input range 0.06 to 30 mV/V
- Switch selectable offset  $\pm 70\%$  FS
- Sealed ABS enclosure
- CE Marked

#### SPECIFICATIONS

##### POWER

AC .....	110 VAC 60 Hz or 220 VAC 50 Hz
DC .....	18-28 VDC

##### EXCITATION

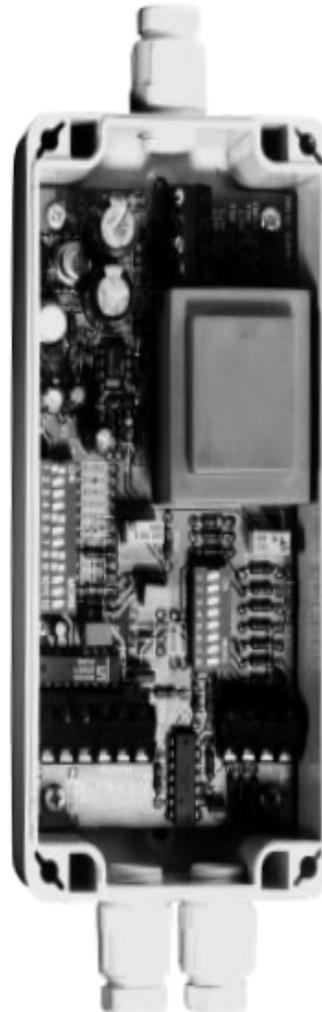
Voltage .....	10 VDC $\pm 5\%$
Current .....	118 mA

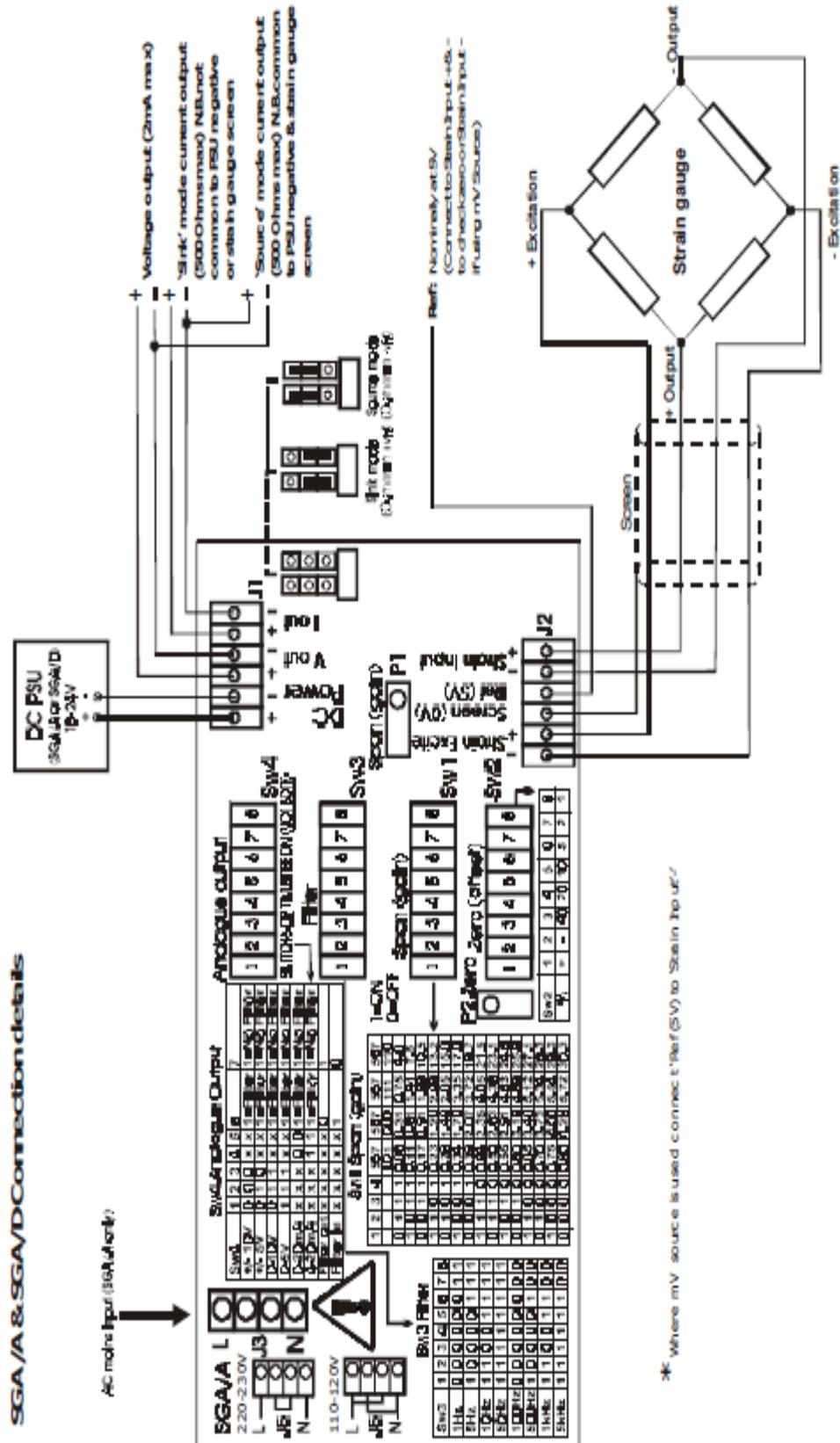
##### PERFORMANCE

Output .....	$\pm 10V$ , $\pm 5V$ Bipolar $0-5V$ , $0-10V$ Unipolar $0-20 mA$ , $4-20 mA$ Unipolar
Input Range .....	$\pm 0.06$ to $\pm 30$ mV/V Switch selectable
Max Bandwidth .....	.6 kHz
Filter .....	1 Hz to 5 kHz Switch selectable
Offset .....	$\pm 70\%$ FS Course and fine adjust
Linearity .....	0.03% FS
Span Temp Coef. ....	0.005%/°F Max
Zero Temp Coef. ....	0.5 $\mu V/^\circ F$ Max

##### ENVIRONMENTAL

Operating Temp .....	$+32^\circ F$ to $+122^\circ F$
Dimensions .....	6.3" x 3.1" x 2.2"
Enclosure .....	Sealed ABS Case, Compression cable seals





## Anexo D – Calibração da célula de carga



**interface**  
ADVANCED FORCE MEASUREMENT

## LOAD CELL CALIBRATION CERTIFICATION

CONDITION: FINAL  
 MODEL: 3211BBE-5K-8 SERIAL: 313571 BRIDGE: A CAPACITY: 5 Ktbf  
 PROCEDURE: C-1257 Mounting Per Interface Installation Instruction 15-5  
 INPUT RESISTANCE: 351.2 OHM OUTPUT RESISTANCE: 351.2 OHM  
 ZERO BALANCE : -0.185 SRO

## TEST CONDITIONS

TEMPERATURE: 75 °F HUMIDITY: 35 % EXCITATION: 10 VDC

## TRACEABILITY

FORCE STANDARD : STD-22 NIST #: 681/281224-11 DUE: 15-SEP-15  
 STANDARD INDICATOR: BRD106 NIST #: 608380  
 TEST INDICATOR : BRD300 NIST #: 608380

## SHUNT CALIBRATION

	Shunt (± 0.01%)	Output	Straight Line Conversion	Connections*
Tension	Kohm	.00000 mV/V	.0000 Ktbf	
Compression	30 Kohm	-2.90089 mV/V	3.3522 Ktbf	-Out to +Exc

\*For models wired with +Sense, -Sense, or -Out leads, resistor connections are exactly to these leads in place of +Exc, -Exc, or -Out respectively.

## PERFORMANCE

	RATED OUTPUT	SEB OUTPUT	NONLINEARITY	HYSTERESIS	SEB
TENSION	.00000 mV/V	.00000 mV/V	.000 %FS	.000 %FS	± .000 %FS
COMPRESSION	-4.32786 mV/V	-4.32685 mV/V	-.033 %FS	.040 %FS	± .023 %FS

STATIC ERROR BAND (SEB) - The band of maximum deviations of the ascending and descending calibration points from a best fit straight line through zero output. It includes the effects of NONLINEARITY, HYSTERESIS, and non-zero MINIMUM LOAD.

TEST LOAD APPLIED (Ktbf)	RECORDED READINGS (mV/V)	
	Tension	Compression
0	.00000	.00000
1	-.86451	
2	-1.72973	
3	-2.59541	
4	-3.46144	
5	-4.32786	
20	-1.73145	
0	.00012	

Interface, Inc. certifies that all calibration measurements are traceable to NIST. Estimated uncertainty of measurements is 0.040%. Results relate to 313571 only. Do not reproduce this report except in full or with Interface written approval.

TECHNICIAN :  Chuck Fedel DATE : 02-DEC-11

INTERFACE INC.  
 7401 EAST BUTHERUS DRIVE · SCOTTSDALE, ARIZONA 85260, U.S.A.  
 TELEPHONE (480)948-5555 · FAX (480)948-1924



## Anexo E - Tabela geral de validação de ensaios

Carga [N]	Altura 80 mm		Altura 90mm		Altura 100mm		Altura 110mm	
	Frequência	[%_D]	Frequência	[%_D]	Frequência	[%_D]	Frequência	[%_D]
[0-1000]	0,3	30	0,3	30	0,3	30	0,3	30
[0-1000]	0,3	40	0,3	40	0,3	40	0,3	40
[0-1000]	0,4	30	0,4	30	0,4	30	0,4	30
[0-1000]	0,4	40	0,4	40	0,4	40	0,4	40
[0-1000]	0,4	50	0,4	50	0,4	50	0,4	50
[0-1000]	0,5	30	0,5	30	0,5	30	0,5	30
[0-1000]	0,5	40	0,5	40	0,5	40	0,5	40
[0-1000]	0,5	50	0,5	50	0,5	50	0,5	50
[0-1000]	0,5	60	0,5	60	0,5	60	0,5	60
[0-1000]	0,5	70	0,6	30	0,6	30	0,5	70
[0-1000]	0,6	30	0,6	40	0,6	40	0,6	30
[0-1000]	0,6	40	0,6	50	0,6	50	0,6	40
[0-1000]	0,6	50	0,6	60	0,6	60	0,6	50
[0-1000]	0,6	60	0,6	70	0,6	70	0,6	60
[0-1000]	0,6	70	0,7	30	0,6	80	0,6	70
[0-1000]	0,6	80	0,7	40	0,7	30	0,7	30
[0-1000]	0,7	30	0,7	50	0,7	40	0,7	40
[0-1000]	0,7	40	0,7	60	0,7	50	0,7	50
[0-1000]	0,7	50	0,7	70	0,7	60	0,7	60
[0-1000]	0,7	60	0,8	30	0,7	70	0,8	40
[0-1000]	0,7	70	0,8	40	0,7	80	0,8	50
[0-1000]	0,8	30	0,8	50	0,8	30	0,8	60
[0-1000]	0,8	40	0,8	60	0,8	40	0,9	40
[0-1000]	0,8	50	0,8	70	0,8	50	0,9	50
[0-1000]	0,8	60	0,9	30	0,8	60	1	40
[0-1000]	0,8	70	0,9	40	0,8	70	1	50
[0-1000]	0,9	30	0,9	50	0,9	30	-	-
[0-1000]	0,9	40	0,9	60	0,9	40	-	-
[0-1000]	0,9	50	1	30	0,9	50	-	-
[0-1000]	0,9	60	1	40	0,9	60	-	-
[0-1000]	1	30	1	50	0,9	70	-	-
[0-1000]	1	40	1	60	1	40	-	-
[0-1000]	1	50	1,1	40	1	50	-	-
[0-1000]	1	60	1,1	50	1	60	-	-
[0-1000]	1,1	40	1,2	40	1,1	40	-	-
[0-1000]	1,1	50	1,2	50	1,1	50	-	-
[0-1000]	1,1	60	-	-	1,1	60	-	-
[0-1000]	1,2	40	-	-	-	-	-	-

[0-1000]	1,2	50	-	-	-	-	-	-
[0-1000]	1,3	40	-	-	-	-	-	-
[0-1000]	1,3	50	-	-	-	-	-	-
[0-2000]	0,3	30	0,3	30	0,3	30	0,3	30
[0-2000]	0,3	40	0,3	40	0,3	40	0,3	40
[0-2000]	0,4	30	0,4	30	0,4	30	0,4	30
[0-2000]	0,4	40	0,4	40	0,4	40	0,4	40
[0-2000]	0,4	50	0,4	50	0,4	50	0,4	50
[0-2000]	0,5	30	0,5	30	0,5	30	0,5	30
[0-2000]	0,5	40	0,5	40	0,5	40	0,5	40
[0-2000]	0,5	50	0,5	50	0,5	50	0,5	50
[0-2000]	0,5	60	0,5	60	0,5	60	0,5	60
[0-2000]	0,6	30	0,5	70	0,6	30	0,5	70
[0-2000]	0,6	40	0,6	30	0,6	40	0,6	30
[0-2000]	0,6	50	0,6	40	0,6	50	0,6	40
[0-2000]	0,6	60	0,6	50	0,6	60	0,6	50
[0-2000]	0,6	70	0,6	60	0,6	70	0,6	60
[0-2000]	0,7	30	0,6	70	0,7	30	0,7	40
[0-2000]	0,7	40	0,7	30	0,7	40	0,7	50
[0-2000]	0,7	50	0,7	40	0,7	50	-	-
[0-2000]	0,7	60	0,7	50	0,7	60	-	-
[0-2000]	0,7	70	0,7	60	0,8	40	-	-
[0-2000]	0,8	30	0,8	30	0,8	50	-	-
[0-2000]	0,8	40	0,8	40	0,8	60	-	-
[0-2000]	0,8	50	0,8	50	0,9	40	-	-
[0-2000]	0,8	60	0,8	60	0,9	50	-	-
[0-2000]	0,9	30	0,9	40	1	50	-	-
[0-2000]	0,9	40	0,9	50	-	-	-	-
[0-2000]	0,9	50	1	40	-	-	-	-
[0-2000]	1	30	-	-	-	-	-	-
[0-2000]	1	40	-	-	-	-	-	-
[0-2000]	1	50	-	-	-	-	-	-
[0-2000]	1,1	40	-	-	-	-	-	-
[0-2000]	1,1	50	-	-	-	-	-	-
[0-2000]	1,2	40	-	-	-	-	-	-
[0-3000]	0,3	30	0,3	30	0,3	30	0,3	30
[0-3000]	0,4	30	0,4	30	0,3	40	0,3	40
[0-3000]	0,4	40	0,4	40	0,4	30	0,4	30
[0-3000]	0,5	30	0,5	30	0,4	40	0,4	40
[0-3000]	0,5	40	0,5	40	0,4	50	0,4	50
[0-3000]	0,5	50	0,5	50	0,5	30	0,5	40
[0-3000]	0,6	30	0,5	60	0,5	40	0,5	50
[0-3000]	0,6	40	0,6	30	0,5	50	0,5	60
[0-3000]	0,6	50	0,6	40	0,5	60	0,6	40
[0-3000]	0,6	60	0,6	50	0,6	30	0,6	50
[0-3000]	0,6	70	0,6	60	0,6	40	-	-

[0-3000]	0,7	30	0,7	40	0,6	50	-	-
[0-3000]	0,7	40	0,7	50	0,6	60	-	-
[0-3000]	0,7	50	0,8	40	0,7	40	-	-
[0-3000]	0,7	60	-	-	0,7	50	-	-
[0-3000]	0,8	40	-	-	-	-	-	-
[0-3000]	0,8	50	-	-	-	-	-	-
[0-3000]	0,9	40	-	-	-	-	-	-
[0-3000]	0,9	50	-	-	-	-	-	-
[0-4000]	0,3	30	0,3	30	0,3	30	0,3	30
[0-4000]	0,4	30	0,4	30	0,3	40	0,3	40
[0-4000]	0,4	40	0,4	40	0,4	40	0,4	40
[0-4000]	0,5	30	0,4	50	0,4	50	0,4	50
[0-4000]	0,5	40	0,5	30	0,5	40	0,4	60
[0-4000]	0,5	50	0,5	40	0,5	50	0,5	50
[0-4000]	0,5	60	0,5	50	0,5	60	-	-
[0-4000]	0,6	40	0,5	60	0,5	70	-	-
[0-4000]	0,6	50	0,6	40	0,6	50	-	-
[0-4000]	0,6	60	0,6	50	-	-	-	-
[0-4000]	0,7	40	0,7	40	-	-	-	-
[0-4000]	0,7	50	0,7	50	-	-	-	-
[0-4000]	0,8	50	-	-	-	-	-	-
[0-5000]	0,3	30	0,3	30	0,3	30	0,3	40
[0-5000]	0,4	30	0,3	40	0,3	40	0,3	50
[0-5000]	0,4	40	0,4	30	0,4	40	0,4	40
[0-5000]	0,5	30	0,4	40	0,4	50	0,4	50
[0-5000]	0,5	40	0,4	50	0,4	60	0,4	60
[0-5000]	0,5	50	0,5	40	-	-	-	-
[0-5000]	0,5	60	0,5	50	-	-	-	-
[0-5000]	0,6	40	0,5	60	-	-	-	-
[0-5000]	0,6	50	0,6	50	-	-	-	-
[0-5000]	0,6	60	-	-	-	-	-	-
[0-5000]	0,7	40	-	-	-	-	-	-
[0-5000]	0,7	50	-	-	-	-	-	-
[0-6000]	0,3	30	0,3	30	0,3	50	0,3	40
[0-6000]	0,3	40	0,3	40	0,3	40	0,3	50
[0-6000]	0,4	30	0,4	40	0,4	40	0,4	50
[0-6000]	0,4	40	0,4	50	0,4	50	0,4	60
[0-6000]	0,4	50	0,4	60	0,4	60	-	-
[0-6000]	0,5	40	0,5	50	-	-	-	-
[0-6000]	0,5	50	-	-	-	-	-	-
[0-6000]	0,5	60	-	-	-	-	-	-
[0-6000]	0,6	50	-	-	-	-	-	-
[0-7000]	0,3	30	0,3	40	0,3	40	0,2	40
[0-7000]	0,3	40	0,3	50	0,3	50	0,3	50
[0-7000]	0,4	40	0,4	50	-	-	0,3	60
[0-7000]	0,4	50	0,4	60	-	-	-	-

[0-7000]	0,5	50	-	-	-	-	-	-
[0-7000]	0,5	60	-	-	-	-	-	-
[0-8000]	0,4	40	0,3	50	0,3	50	0,2	40
[0-8000]	0,4	50	0,3	60	0,3	60	0,2	50
[0-8000]	0,5	50	0,4	60	-	-	0,3	60
[0-8000]	0,5	60	-	-	-	-	0,3	70
[0-9000]	0,3	40	0,3	40	0,3	60	-	-
[0-9000]	0,3	50	0,3	50	0,3	70	-	-
[0-9000]	0,4	50	0,4	60	-	-	-	-
[0-9000]	0,4	60	-	-	-	-	-	-
[0-10000]	0,3	40	0,3	50	0,2	50	-	-
[0-10000]	0,3	50	0,3	60	-	-	-	-
[0-10000]	0,4	60	-	-	-	-	-	-
[0-11000]	0,3	50	0,3	60	-	-	-	-
[0-11000]	0,3	60	0,3	70	-	-	-	-
[0-11000]	0,4	60	-	-	-	-	-	-
[0-12000]	0,3	50	-	-	-	-	-	-
[0-12000]	0,3	60	-	-	-	-	-	-
[0-12000]	0,4	60	-	-	-	-	-	-
[0-13000]	0,3	50	-	-	-	-	-	-
[0-13000]	0,3	60	-	-	-	-	-	-
[1000-2000]	0,6	50	0,6	30	0,6	40	0,6	30
[1000-2000]	0,7	30	0,6	40	0,6	50	0,6	40
[1000-2000]	0,7	40	0,6	50	0,6	60	0,6	50
[1000-2000]	0,7	50	0,6	60	0,7	30	0,6	60
[1000-2000]	0,7	60	0,7	30	0,7	40	0,7	30
[1000-2000]	0,7	70	0,7	40	0,7	50	0,7	40
[1000-2000]	0,8	30	0,7	50	0,7	60	0,7	50
[1000-2000]	0,8	40	0,7	60	0,7	70	0,7	60
[1000-2000]	0,8	50	0,7	70	0,8	30	0,7	70
[1000-2000]	0,8	60	0,8	30	0,8	40	0,8	30
[1000-2000]	0,8	70	0,8	40	0,8	50	0,8	40
[1000-2000]	0,9	30	0,8	50	0,8	60	0,8	50
[1000-2000]	0,9	40	0,8	60	0,9	30	0,8	60
[1000-2000]	-	-	-	-	0,9	40	0,9	30
[1000-2000]	-	-	-	-	-	-	0,9	40
[1000-3000]	0,5	50	0,5	50	0,6	40	0,6	30
[1000-3000]	0,6	30	0,6	30	0,6	50	0,6	40
[1000-3000]	0,6	40	0,6	40	0,6	60	0,6	50
[1000-3000]	0,6	50	0,6	50	0,6	70	0,6	60
[1000-3000]	0,6	60	0,6	60	0,7	30	0,6	70
[1000-3000]	0,7	30	0,7	30	0,7	40	0,7	30
[1000-3000]	0,7	40	0,7	40	0,7	50	0,7	40
[1000-3000]	0,7	50	0,7	50	0,7	60	0,7	50
[1000-3000]	0,7	60	0,7	60	0,8	40	0,7	60
[1000-3000]	0,8	30	0,7	70	0,8	50	0,8	40

[1000-3000]	0,8	40	0,8	30	-	-	0,8	50
[1000-3000]	0,8	50	0,8	40	-	-	-	-
[1000-3000]	0,9	30	0,8	50	-	-	-	-
[1000-3000]	0,9	40	-	-	-	-	-	-
[1000-4000]	0,4	30	0,5	50	0,5	50	0,5	40
[1000-4000]	0,4	40	0,5	60	0,5	60	0,5	50
[1000-4000]	0,5	50	0,6	40	0,6	30	0,5	60
[1000-4000]	0,5	30	0,6	50	0,6	40	0,6	40
[1000-4000]	0,5	40	0,6	60	0,6	50	0,6	50
[1000-4000]	0,6	30	0,6	70	0,6	60	0,6	60
[1000-4000]	0,6	40	0,7	40	0,6	70	0,6	70
[1000-4000]	0,6	50	0,7	50	0,7	40	0,7	40
[1000-4000]	0,6	60	0,7	60	0,7	50	0,7	50
[1000-4000]	0,7	30	-	-	0,7	60	-	-
[1000-4000]	0,7	40	-	-	0,8	50	-	-
[1000-4000]	0,7	50	-	-	-	-	-	-
[1000-4000]	0,7	60	-	-	-	-	-	-
[1000-4000]	0,8	40	-	-	-	-	-	-
[1000-4000]	0,8	50	-	-	-	-	-	-
[1000-5000]	0,5	40	0,4	40	0,5	50	0,5	40
[1000-5000]	0,5	50	0,4	50	0,5	60	0,5	50
[1000-5000]	0,6	40	0,5	40	0,5	70	0,5	60
[1000-5000]	0,6	50	0,5	50	0,6	50	0,5	70
[1000-5000]	0,6	60	0,5	60	0,6	60	0,6	40
[1000-5000]	0,7	40	0,6	40	-	-	0,6	50
[1000-5000]	0,7	50	0,6	50	-	-	0,6	60
[1000-5000]	0,7	60	0,6	60	-	-	-	-
[1000-5000]	-	-	0,6	70	-	-	-	-
[1000-5000]	-	-	0,7	50	-	-	-	-
[1000-5000]	-	-	0,7	60	-	-	-	-
[1000-6000]	0,4	30	0,4	60	0,5	50	0,4	60
[1000-6000]	0,4	40	0,5	40	0,5	60	0,5	60
[1000-6000]	0,5	40	0,5	50	0,5	70	0,5	70
[1000-6000]	0,5	50	0,5	60	0,6	50	-	-
[1000-6000]	0,6	40	0,5	70	0,6	60	-	-
[1000-6000]	0,6	50	0,6	60	-	-	-	-
[1000-6000]	0,6	60	-	-	-	-	-	-
[1000-6000]	0,6	70	-	-	-	-	-	-
[1000-6000]	0,7	50	-	-	-	-	-	-
[1000-6000]	0,7	60	-	-	-	-	-	-
[1000-7000]	0,4	50	0,4	60	0,4	50	0,4	50
[1000-7000]	0,5	50	0,4	70	0,4	60	0,4	60
[1000-7000]	0,5	60	0,5	60	0,4	70	0,4	70
[1000-7000]	0,5	70	0,5	70	0,5	60	-	-
[1000-7000]	0,6	50	-	-	0,5	70	-	-
[1000-7000]	0,6	60	-	-	-	-	-	-

[1000-7000]	0,6	70	-	-	-	-	-	-
[1000-7000]	0,7	50	-	-	-	-	-	-
[1000-7000]	0,7	60	-	-	-	-	-	-
[1000-8000]	0,4	40	0,3	60	0,3	60	0,3	60
[1000-8000]	0,4	50	0,4	60	0,4	60	0,4	70
[1000-8000]	0,4	60	0,4	70	0,4	70	-	-
[1000-8000]	0,5	50	-	-	-	-	-	-
[1000-8000]	0,5	60	-	-	-	-	-	-
[1000-8000]	0,5	70	-	-	-	-	-	-
[1000-8000]	0,6	60	-	-	-	-	-	-
[1000-9000]	0,4	50	0,3	60	0,3	60	0,3	60
[1000-9000]	0,4	60	0,4	60	0,4	60	0,4	70
[1000-9000]	0,4	70	0,4	70	0,4	70	-	-
[1000-9000]	0,5	50	-	-	-	-	-	-
[1000-9000]	0,5	60	-	-	-	-	-	-
[1000-9000]	0,5	70	-	-	-	-	-	-
[1000-10000]	0,4	50	0,4	50	0,3	60	0,3	60
[1000-10000]	0,4	60	0,4	60	0,3	70	0,3	70
[1000-10000]	0,5	60	0,4	70	-	-	-	-
[1000-10000]	0,5	70	-	-	-	-	-	-
[1000-11000]	0,4	60	0,4	60	0,3	60	-	-
[1000-11000]	0,4	70	0,4	70	0,3	70	-	-
[1000-11000]	0,5	60	-	-	-	-	-	-
[1000-12000]	0,4	60	0,3	60	-	-	-	-
[1000-12000]	0,4	70	0,3	70	-	-	-	-
[1000-13000]	0,3	60	-	-	-	-	-	-
[1000-13000]	0,3	70	-	-	-	-	-	-
[1000-13000]	0,3	80	-	-	-	-	-	-
[1000-13000]	0,4	70	-	-	-	-	-	-
[1000-14000]	0,3	60	-	-	-	-	-	-
[1000-14000]	0,3	70	-	-	-	-	-	-
[2000-3000]	0,7	50	0,6	50	0,6	50	0,7	50
[2000-3000]	0,7	60	0,7	40	0,7	30	0,7	60
[2000-3000]	0,8	30	0,7	50	0,7	40	0,7	70
[2000-3000]	0,8	40	0,7	60	0,7	50	0,8	30
[2000-3000]	0,8	50	0,8	30	0,7	60	0,8	40
[2000-3000]	0,8	60	0,8	40	0,7	70	0,8	50
[2000-3000]	0,8	70	0,8	50	0,8	30	0,8	60
[2000-3000]	0,9	30	0,8	60	0,8	40	0,8	70
[2000-3000]	0,9	40	0,8	70	0,8	50	0,9	30
[2000-3000]	0,9	50	0,9	30	0,8	60	0,9	40
[2000-3000]	0,9	60	0,9	40	0,8	70	0,9	50
[2000-3000]	0,9	70	0,9	50	0,9	30	0,9	60
[2000-3000]	1	30	0,9	60	0,9	40	-	-
[2000-3000]	1	40	0,9	70	0,9	50	-	-
[2000-3000]	1	50	1	30	-	-	-	-

[2000-3000]	-	-	1	40	-	-	-	-
[2000-4000]	0,6	50	0,5	50	0,6	50	0,6	60
[2000-4000]	0,6	60	0,6	40	0,6	60	0,6	70
[2000-4000]	0,7	30	0,6	50	0,7	30	0,7	30
[2000-4000]	0,7	40	0,6	60	0,7	40	0,7	40
[2000-4000]	0,7	50	0,7	30	0,7	50	0,7	50
[2000-4000]	0,7	60	0,7	40	0,7	60	0,7	60
[2000-4000]	0,7	70	0,7	50	0,7	70	0,7	70
[2000-4000]	0,8	30	0,7	60	0,8	30	0,8	30
[2000-4000]	0,8	40	0,7	70	0,8	40	0,8	40
[2000-4000]	0,8	50	0,8	30	0,8	50	0,8	50
[2000-4000]	0,8	60	0,8	40	0,8	60	0,8	60
[2000-4000]	0,8	70	0,8	50	0,8	70	0,9	40
[2000-4000]	0,9	30	0,8	60	0,9	30	0,9	50
[2000-4000]	0,9	40	0,9	40	0,9	40	-	-
[2000-4000]	0,9	50	0,9	50	0,9	50	-	-
[2000-4000]	0,9	60	-	-	-	-	-	-
[2000-4000]	1	30	-	-	-	-	-	-
[2000-4000]	1	40	-	-	-	-	-	-
[2000-5000]	0,6	50	0,5	50	0,5	60	0,5	60
[2000-5000]	0,6	60	0,5	60	0,6	40	0,6	40
[2000-5000]	0,7	30	0,6	40	0,6	50	0,6	50
[2000-5000]	0,7	40	0,6	50	0,6	60	0,6	60
[2000-5000]	0,7	50	0,6	60	0,6	70	0,6	70
[2000-5000]	0,7	60	0,6	70	0,7	40	0,7	50
[2000-5000]	0,7	70	0,7	40	0,7	50	0,7	60
[2000-5000]	0,8	30	0,7	50	0,7	60	0,7	70
[2000-5000]	0,8	40	0,7	60	0,7	70	0,8	50
[2000-5000]	0,8	50	0,7	70	0,8	50	-	-
[2000-5000]	0,8	60	0,8	50	0,8	60	-	-
[2000-5000]	0,8	70	0,8	60	-	-	-	-
[2000-5000]	0,9	30	0,9	40	-	-	-	-
[2000-5000]	0,9	40	0,9	50	-	-	-	-
[2000-5000]	0,9	50	-	-	-	-	-	-
[2000-5000]	0,9	60	-	-	-	-	-	-
[2000-5000]	1	40	-	-	-	-	-	-
[2000-6000]	0,6	50	0,5	50	0,5	60	0,6	50
[2000-6000]	0,6	60	0,5	60	0,6	40	0,6	60
[2000-6000]	0,7	40	0,5	70	0,6	50	0,6	70
[2000-6000]	0,7	50	0,6	50	0,6	60	-	-
[2000-6000]	0,7	60	0,6	60	0,6	70	-	-
[2000-6000]	0,7	70	0,6	70	0,7	50	-	-
[2000-6000]	0,8	40	0,7	60	0,7	60	-	-
[2000-6000]	0,8	50	0,7	70	0,7	70	-	-
[2000-6000]	0,8	60	-	-	-	-	-	-
[2000-6000]	0,9	40	-	-	-	-	-	-

[2000-6000]	0,9	50	-	-	-	-	-	-
[2000-7000]	0,6	40	0,4	60	0,4	60	0,5	60
[2000-7000]	0,6	50	0,5	50	0,5	50	0,5	70
[2000-7000]	0,6	60	0,5	60	0,5	60	-	-
[2000-7000]	0,7	40	0,5	70	0,5	70	-	-
[2000-7000]	0,7	50	0,6	60	-	-	-	-
[2000-7000]	0,7	60	-	-	-	-	-	-
[2000-7000]	0,7	70	-	-	-	-	-	-
[2000-7000]	0,8	50	-	-	-	-	-	-
[2000-7000]	0,8	60	-	-	-	-	-	-
[2000-8000]	0,5	40	0,4	60	0,4	70	0,4	60
[2000-8000]	0,5	50	0,4	70	0,5	60	0,4	70
[2000-8000]	0,6	40	0,5	60	0,5	70	0,5	70
[2000-8000]	0,6	50	0,5	70	-	-	-	-
[2000-8000]	0,6	60	-	-	-	-	-	-
[2000-8000]	0,6	70	-	-	-	-	-	-
[2000-8000]	0,7	50	-	-	-	-	-	-
[2000-8000]	0,7	60	-	-	-	-	-	-
[2000-8000]	0,7	70	-	-	-	-	-	-
[2000-9000]	0,5	50	0,4	60	0,4	60	0,4	70
[2000-9000]	0,5	60	0,4	70	0,4	70	-	-
[2000-9000]	0,5	70	0,4	80	0,5	60	-	-
[2000-9000]	0,6	60	-	-	0,5	70	-	-
[2000-9000]	0,6	70	-	-	-	-	-	-
[2000-10000]	0,4	60	0,4	60	0,3	70	0,3	70
[2000-10000]	0,5	60	0,5	60	0,4	70	0,3	80
[2000-10000]	0,5	70	0,5	70	-	-	-	-
[2000-11000]	0,4	60	0,4	60	0,3	70	0,3	60
[2000-11000]	0,4	70	0,4	70	0,4	70	0,3	70
[2000-11000]	0,5	50	0,5	70	-	-	-	-
[2000-11000]	0,5	60	-	-	-	-	-	-
[2000-11000]	0,5	70	-	-	-	-	-	-
[2000-12000]	0,4	50	0,4	70	0,3	60	-	-
[2000-12000]	0,4	60	-	-	0,3	70	-	-
[2000-12000]	0,4	70	-	-	0,3	80	-	-
[2000-12000]	0,5	60	-	-	-	-	-	-
[2000-12000]	0,5	70	-	-	-	-	-	-
[2000-13000]	0,3	60	0,3	60	-	-	-	-
[2000-13000]	0,4	60	0,3	70	-	-	-	-
[2000-13000]	0,4	70	-	-	-	-	-	-
[2000-14000]	0,3	70	-	-	-	-	-	-
[2000-14000]	0,3	80	-	-	-	-	-	-
[3000-4000]	0,7	50	0,8	40	0,7	40	0,7	40
[3000-4000]	0,7	60	0,8	50	0,7	50	0,7	50
[3000-4000]	0,8	30	0,8	60	0,7	60	0,7	60
[3000-4000]	0,8	40	0,8	70	0,7	70	0,7	70

[3000-4000]	0,8	50	0,9	30	0,8	30	0,8	30
[3000-4000]	0,8	60	0,9	40	0,8	40	0,8	40
[3000-4000]	0,8	70	0,9	50	0,8	50	0,8	50
[3000-4000]	0,9	30	0,9	60	0,8	60	0,8	60
[3000-4000]	0,9	40	0,9	70	0,8	70	0,8	70
[3000-4000]	0,9	50	1	30	0,8	80	0,8	80
[3000-4000]	0,9	60	1	40	0,9	30	0,9	30
[3000-4000]	0,9	70	1	50	0,9	40	0,9	40
[3000-4000]	0,9	80	1	60	0,9	50	0,9	50
[3000-4000]	1	30	-	-	0,9	60	0,9	60
[3000-4000]	1	40	-	-	0,9	70	0,9	70
[3000-4000]	1	50	-	-	0,9	80	1	30
[3000-4000]	1	60	-	-	1	30	1	40
[3000-4000]	1,1	30	-	-	1	40	1	50
[3000-4000]	1,1	40	-	-	1	50	-	-
[3000-4000]	-	-	-	-	1	60	-	-
[3000-5000]	0,7	40	0,6	60	0,6	60	0,7	30
[3000-5000]	0,7	50	0,6	70	0,7	40	0,7	40
[3000-5000]	0,7	60	0,7	60	0,7	50	0,7	50
[3000-5000]	0,7	70	0,7	70	0,7	60	0,7	60
[3000-5000]	0,8	30	0,8	40	0,7	70	0,7	70
[3000-5000]	0,8	40	0,8	50	0,8	30	0,8	30
[3000-5000]	0,8	50	0,8	60	0,8	40	0,8	40
[3000-5000]	0,8	60	0,8	70	0,8	50	0,8	50
[3000-5000]	0,8	70	0,9	40	0,8	60	0,8	60
[3000-5000]	0,8	80	0,9	50	0,8	70	0,8	70
[3000-5000]	0,9	30	0,9	60	0,9	30	0,9	50
[3000-5000]	0,9	40	0,9	70	0,9	40	-	-
[3000-5000]	0,9	50	1	50	0,9	50	-	-
[3000-5000]	0,9	60	-	-	0,9	60	-	-
[3000-5000]	0,9	70	-	-	0,9	70	-	-
[3000-5000]	1	30	-	-	1	40	-	-
[3000-5000]	1	40	-	-	1	50	-	-
[3000-5000]	1	50	-	-	-	-	-	-
[3000-5000]	1	60	-	-	-	-	-	-
[3000-5000]	1,1	30	-	-	-	-	-	-
[3000-5000]	1,1	40	-	-	-	-	-	-
[3000-6000]	0,7	60	0,5	50	0,6	50	0,6	60
[3000-6000]	0,7	70	0,5	60	0,6	60	0,6	70
[3000-6000]	0,8	40	0,6	40	0,6	70	0,7	40
[3000-6000]	0,8	50	0,6	50	0,7	40	0,7	50
[3000-6000]	0,8	60	0,6	60	0,7	50	0,7	60
[3000-6000]	0,8	70	0,6	70	0,7	60	0,7	70
[3000-6000]	0,9	40	0,7	50	0,7	70	0,8	60
[3000-6000]	0,9	50	0,7	60	0,8	40	-	-
[3000-6000]	0,9	60	0,7	70	0,8	50	-	-

[3000-6000]	1	40	0,8	40	0,8	60	-	-
[3000-6000]	1	50	0,8	50	-	-	-	-
[3000-6000]	-	-	0,8	60	-	-	-	-
[3000-6000]	-	-	0,8	70	-	-	-	-
[3000-7000]	0,7	50	0,5	60	0,5	60	0,5	60
[3000-7000]	0,7	60	0,6	40	0,6	40	0,5	70
[3000-7000]	0,7	70	0,6	50	0,6	50	0,6	60
[3000-7000]	0,8	40	0,6	60	0,6	60	0,6	70
[3000-7000]	0,8	50	0,6	70	0,6	70	-	-
[3000-7000]	0,8	60	0,7	50	0,7	50	-	-
[3000-7000]	0,8	70	0,7	60	0,7	60	-	-
[3000-7000]	0,9	40	0,7	70	0,7	70	-	-
[3000-7000]	0,9	50	-	-	-	-	-	-
[3000-7000]	0,9	60	-	-	-	-	-	-
[3000-7000]	1	50	-	-	-	-	-	-
[3000-8000]	0,6	50	0,4	60	0,5	50	0,4	60
[3000-8000]	0,6	60	0,5	50	0,5	60	0,5	60
[3000-8000]	0,6	70	0,5	60	0,5	70	0,5	70
[3000-8000]	0,7	40	0,5	70	0,5	80	0,5	80
[3000-8000]	0,7	50	0,6	60	0,6	60	-	-
[3000-8000]	0,7	60	-	-	0,6	70	-	-
[3000-8000]	0,7	70	-	-	-	-	-	-
[3000-8000]	0,8	50	-	-	-	-	-	-
[3000-8000]	0,8	60	-	-	-	-	-	-
[3000-9000]	0,5	50	0,4	70	0,4	60	0,4	60
[3000-9000]	0,5	60	0,5	70	0,4	70	0,4	70
[3000-9000]	0,6	50	0,5	80	0,5	60	0,4	80
[3000-9000]	0,6	60	-	-	0,5	70	-	-
[3000-9000]	0,6	70	-	-	-	-	-	-
[3000-9000]	0,7	50	-	-	-	-	-	-
[3000-9000]	0,7	60	-	-	-	-	-	-
[3000-9000]	0,7	70	-	-	-	-	-	-
[3000-9000]	0,8	50	-	-	-	-	-	-
[3000-9000]	0,8	60	-	-	-	-	-	-
[3000-10000]	0,5	40	0,4	60	0,4	60	0,3	60
[3000-10000]	0,5	50	0,4	70	0,4	70	0,3	70
[3000-10000]	0,5	60	0,4	80	0,5	60	-	-
[3000-10000]	0,6	50	-	-	0,5	70	-	-
[3000-10000]	0,6	60	-	-	-	-	-	-
[3000-10000]	0,6	70	-	-	-	-	-	-
[3000-10000]	0,7	60	-	-	-	-	-	-
[3000-11000]	0,4	50	0,4	60	0,3	70	0,3	70
[3000-11000]	0,4	60	0,4	70	0,4	70	-	-
[3000-11000]	0,5	50	0,5	70	-	-	-	-
[3000-11000]	0,5	60	-	-	-	-	-	-
[3000-11000]	0,5	70	-	-	-	-	-	-

[3000-11000]	0,6	70	-	-	-	-	-	-
[3000-12000]	0,4	60	0,4	60	0,3	60	-	-
[3000-12000]	0,4	70	0,4	70	0,3	70	-	-
[3000-12000]	0,4	80	0,5	70	0,3	80	-	-
[3000-13000]	0,4	50	0,4	70	-	-	-	-
[3000-13000]	0,4	60	0,4	80	-	-	-	-
[3000-13000]	0,4	70	-	-	-	-	-	-
[3000-13000]	0,5	70	-	-	-	-	-	-
[3000-14000]	0,4	70	-	-	-	-	-	-
[3000-14000]	0,4	80	-	-	-	-	-	-
[4000-5000]	0,8	30	0,8	40	0,7	40	0,7	50
[4000-5000]	0,8	40	0,8	50	0,7	50	0,7	60
[4000-5000]	0,8	50	0,8	60	0,7	60	0,7	70
[4000-5000]	0,8	60	0,8	70	0,7	70	0,8	30
[4000-5000]	0,8	70	0,9	30	0,8	30	0,8	40
[4000-5000]	0,9	30	0,9	40	0,8	40	0,8	50
[4000-5000]	0,9	40	0,9	50	0,8	50	0,8	60
[4000-5000]	0,9	50	0,9	60	0,8	60	0,8	70
[4000-5000]	0,9	60	0,9	70	0,8	70	0,8	80
[4000-5000]	0,9	70	1	30	0,8	80	0,9	30
[4000-5000]	1	30	1	40	0,9	30	0,9	40
[4000-5000]	1	40	1	50	0,9	40	0,9	50
[4000-5000]	1	50	1	60	0,9	50	0,9	60
[4000-5000]	1	60	1,1	40	0,9	60	0,9	70
[4000-5000]	1	70	1,1	50	0,9	70	0,9	80
[4000-5000]	1,1	30	-	-	1	40	1	30
[4000-5000]	1,1	40	-	-	1	50	1	40
[4000-5000]	1,1	50	-	-	1	60	1	50
[4000-5000]	-	-	-	-	1,1	40	1	60
[4000-5000]	-	-	-	-	-	-	1,1	40
[4000-6000]	0,7	50	0,7	60	0,6	60	0,6	60
[4000-6000]	0,7	60	0,7	70	0,7	40	0,7	50
[4000-6000]	0,8	30	0,8	40	0,7	50	0,7	60
[4000-6000]	0,8	40	0,8	50	0,7	60	0,7	70
[4000-6000]	0,8	50	0,8	60	0,7	70	0,8	30
[4000-6000]	0,8	60	0,8	70	0,8	30	0,8	40
[4000-6000]	0,8	70	0,8	80	0,8	40	0,8	50
[4000-6000]	0,9	30	0,9	40	0,8	50	0,8	60
[4000-6000]	0,9	40	0,9	50	0,8	60	0,8	70
[4000-6000]	0,9	50	0,9	60	0,8	70	0,9	40
[4000-6000]	0,9	60	0,9	70	0,8	80	0,9	50
[4000-6000]	0,9	70	1	50	0,9	40	0,9	60
[4000-6000]	1	30	1	60	0,9	50	-	-
[4000-6000]	1	40	-	-	0,9	60	-	-
[4000-6000]	1	50	-	-	-	-	-	-
[4000-6000]	1	60	-	-	-	-	-	-

[4000-6000]	1,1	40	-	-	-	-	-	-
[4000-6000]	1,1	50	-	-	-	-	-	-
[4000-7000]	0,7	50	0,6	60	0,6	60	0,6	60
[4000-7000]	0,7	60	0,6	70	0,6	70	0,6	70
[4000-7000]	0,8	40	0,7	50	0,7	40	0,7	50
[4000-7000]	0,8	50	0,7	60	0,7	50	0,7	60
[4000-7000]	0,8	60	0,7	70	0,7	60	0,7	70
[4000-7000]	0,8	70	0,8	40	0,7	70	0,8	60
[4000-7000]	0,9	30	0,8	50	0,8	40	-	-
[4000-7000]	0,9	40	0,8	60	0,8	50	-	-
[4000-7000]	0,9	50	0,8	70	0,8	60	-	-
[4000-7000]	0,9	60	0,8	80	0,8	70	-	-
[4000-7000]	0,9	70	0,9	50	0,9	50	-	-
[4000-7000]	1	40	0,9	60	-	-	-	-
[4000-7000]	1	50	-	-	-	-	-	-
[4000-7000]	1	60	-	-	-	-	-	-
[4000-7000]	1,1	40	-	-	-	-	-	-
[4000-7000]	1,1	50	-	-	-	-	-	-
[4000-8000]	0,7	50	0,6	40	0,5	60	0,5	60
[4000-8000]	0,7	60	0,6	50	0,5	70	0,5	70
[4000-8000]	0,7	70	0,6	60	0,6	50	0,6	50
[4000-8000]	0,8	40	0,6	70	0,6	60	0,6	60
[4000-8000]	0,8	50	0,7	40	0,6	70	0,6	70
[4000-8000]	0,8	60	0,7	50	0,6	80	0,7	60
[4000-8000]	0,8	70	0,7	60	0,7	60	-	-
[4000-8000]	0,9	40	0,7	70	0,7	70	-	-
[4000-8000]	0,9	50	0,7	80	-	-	-	-
[4000-8000]	0,9	60	0,8	60	-	-	-	-
[4000-9000]	0,6	60	0,5	50	0,5	60	0,4	70
[4000-9000]	0,6	70	0,5	60	0,5	70	0,5	50
[4000-9000]	0,7	50	0,5	70	0,5	80	0,5	60
[4000-9000]	0,7	60	0,5	80	0,6	60	0,5	70
[4000-9000]	0,7	70	0,6	50	0,6	70	0,5	80
[4000-9000]	0,8	40	0,6	60	-	-	-	-
[4000-9000]	0,8	50	0,6	70	-	-	-	-
[4000-9000]	0,8	60	0,7	50	-	-	-	-
[4000-9000]	0,8	70	0,7	60	-	-	-	-
[4000-9000]	0,9	50	0,7	70	-	-	-	-
[4000-9000]	0,9	60	-	-	-	-	-	-
[4000-10000]	0,5	40	0,4	60	0,4	60	0,4	60
[4000-10000]	0,5	50	0,5	50	0,4	70	0,4	70
[4000-10000]	0,5	60	0,5	60	0,4	80	0,4	80
[4000-10000]	0,5	70	0,5	70	0,5	70	-	-
[4000-10000]	0,6	50	0,5	80	-	-	-	-
[4000-10000]	0,6	60	-	-	-	-	-	-
[4000-10000]	0,6	70	-	-	-	-	-	-

[4000-10000]	0,6	80	-	-	-	-	-	-
[4000-10000]	0,7	60	-	-	-	-	-	-
[4000-10000]	0,7	70	-	-	-	-	-	-
[4000-11000]	0,5	50	0,4	60	0,4	60	0,3	70
[4000-11000]	0,5	60	0,4	70	0,4	70	0,3	80
[4000-11000]	0,6	50	0,4	80	0,4	80	0,4	60
[4000-11000]	0,6	60	0,5	70	0,5	70	0,4	70
[4000-11000]	0,6	70	0,5	80	-	-	-	-
[4000-11000]	0,7	60	-	-	-	-	-	-
[4000-11000]	0,7	70	-	-	-	-	-	-
[4000-12000]	0,4	60	0,4	60	0,3	70	-	-
[4000-12000]	0,5	50	0,5	60	0,3	80	-	-
[4000-12000]	0,5	60	0,5	70	-	-	-	-
[4000-12000]	0,5	70	0,5	80	-	-	-	-
[4000-12000]	0,6	70	-	-	-	-	-	-
[4000-13000]	0,4	50	0,4	60	-	-	-	-
[4000-13000]	0,4	60	0,4	70	-	-	-	-
[4000-13000]	0,4	70	0,4	80	-	-	-	-
[4000-14000]	0,3	70	-	-	-	-	-	-
[4000-14000]	0,3	80	-	-	-	-	-	-
[4000-14000]	0,4	70	-	-	-	-	-	-
[4000-14000]	0,4	80	-	-	-	-	-	-
[5000-6000]	0,8	30	0,7	50	0,7	50	0,7	50
[5000-6000]	0,8	40	0,7	60	0,7	60	0,7	60
[5000-6000]	0,8	50	0,8	30	0,7	70	0,7	70
[5000-6000]	0,8	60	0,8	40	0,8	30	0,8	30
[5000-6000]	0,9	30	0,8	50	0,8	40	0,8	40
[5000-6000]	0,9	40	0,8	60	0,8	50	0,8	50
[5000-6000]	0,9	50	0,8	70	0,8	60	0,8	60
[5000-6000]	0,9	60	0,8	80	0,8	70	0,8	70
[5000-6000]	0,9	70	0,9	30	0,9	30	0,8	80
[5000-6000]	0,9	80	0,9	40	0,9	40	0,9	30
[5000-6000]	1	30	0,9	50	0,9	50	0,9	40
[5000-6000]	1	40	0,9	60	0,9	60	0,9	50
[5000-6000]	1	50	0,9	70	0,9	70	0,9	60
[5000-6000]	1	60	0,9	80	0,9	80	0,9	70
[5000-6000]	1	70	1	30	1	30	0,9	80
[5000-6000]	1,1	30	1	40	1	40	1	30
[5000-6000]	1,1	40	1	50	1	50	1	40
[5000-6000]	1,1	50	1	60	1	60	1	50
[5000-6000]	1,1	60	1	70	-	-	1	60
[5000-6000]	-	-	1,1	30	-	-	-	-
[5000-6000]	-	-	1,1	40	-	-	-	-
[5000-6000]	-	-	1,1	50	-	-	-	-
[5000-7000]	0,7	50	0,6	50	0,7	50	0,6	60
[5000-7000]	0,7	60	0,6	60	0,7	60	0,7	50

[5000-7000]	0,8	30	0,7	40	0,7	70	0,7	60
[5000-7000]	0,8	40	0,7	50	0,8	30	0,7	70
[5000-7000]	0,8	50	0,7	60	0,8	40	0,7	80
[5000-7000]	0,8	60	0,8	40	0,8	50	0,8	40
[5000-7000]	0,8	70	0,8	50	0,8	60	0,8	50
[5000-7000]	0,8	80	0,8	60	0,8	70	0,8	60
[5000-7000]	0,9	30	0,8	70	0,8	80	0,8	70
[5000-7000]	0,9	40	0,9	30	0,9	30	0,8	80
[5000-7000]	0,9	50	0,9	40	0,9	40	0,9	60
[5000-7000]	0,9	60	0,9	50	0,9	50	-	-
[5000-7000]	1	30	0,9	60	0,9	60	-	-
[5000-7000]	1	40	0,9	70	0,9	70	-	-
[5000-7000]	1	50	0,9	80	1	40	-	-
[5000-7000]	1	60	1	40	1	50	-	-
[5000-7000]	1,1	40	1	50	-	-	-	-
[5000-7000]	1,1	50	1	60	-	-	-	-
[5000-7000]	-	-	1,1	40	-	-	-	-
[5000-7000]	-	-	1,1	50	-	-	-	-
[5000-8000]	0,7	50	0,6	50	0,6	40	0,6	50
[5000-8000]	0,7	60	0,6	60	0,6	50	0,6	60
[5000-8000]	0,7	70	0,6	70	0,6	60	0,6	70
[5000-8000]	0,8	30	0,7	40	0,6	70	0,7	40
[5000-8000]	0,8	40	0,7	50	0,6	80	0,7	50
[5000-8000]	0,8	50	0,7	60	0,7	40	0,7	60
[5000-8000]	0,8	60	0,7	70	0,7	50	0,7	70
[5000-8000]	0,8	70	0,7	80	0,7	60	0,8	50
[5000-8000]	0,9	40	0,8	40	0,7	70	0,8	60
[5000-8000]	0,9	50	0,8	50	0,7	80	-	-
[5000-8000]	0,9	60	0,8	60	0,8	50	-	-
[5000-8000]	0,9	70	0,8	70	0,8	60	-	-
[5000-8000]	1	40	0,8	80	0,8	70	-	-
[5000-8000]	1	50	0,9	40	0,9	40	-	-
[5000-8000]	1	60	0,9	50	0,9	50	-	-
[5000-8000]	1	70	0,9	60	0,9	60	-	-
[5000-8000]	1,1	40	-	-	-	-	-	-
[5000-8000]	1,1	50	-	-	-	-	-	-
[5000-9000]	0,7	50	0,5	60	0,5	60	0,5	60
[5000-9000]	0,7	60	0,6	50	0,5	70	0,5	70
[5000-9000]	0,7	70	0,6	60	0,6	50	0,5	80
[5000-9000]	0,8	40	0,6	70	0,6	60	0,6	60
[5000-9000]	0,8	50	0,7	40	0,6	70	0,6	70
[5000-9000]	0,8	60	0,7	50	0,6	80	0,6	80
[5000-9000]	0,8	70	0,7	60	0,7	60	-	-
[5000-9000]	0,9	40	0,8	50	0,7	70	-	-
[5000-9000]	0,9	50	0,8	60	-	-	-	-
[5000-9000]	0,9	60	0,8	70	-	-	-	-

[5000-9000]	0,9	70	-	-	-	-	-	-
[5000-9000]	1	50	-	-	-	-	-	-
[5000-9000]	1	60	-	-	-	-	-	-
[5000-10000]	0,6	60	0,5	50	0,4	70	0,4	60
[5000-10000]	0,7	50	0,5	60	0,5	60	0,4	70
[5000-10000]	0,7	60	0,5	70	0,5	70	0,4	80
[5000-10000]	0,7	70	0,5	80	0,5	80	-	-
[5000-10000]	0,8	50	0,6	50	-	-	-	-
[5000-10000]	0,8	60	0,6	60	-	-	-	-
[5000-10000]	0,8	70	0,6	70	-	-	-	-
[5000-10000]	0,9	60	0,6	80	-	-	-	-
[5000-10000]	-	-	0,7	60	-	-	-	-
[5000-11000]	0,6	50	0,5	50	0,4	70	0,3	70
[5000-11000]	0,6	60	0,5	60	0,4	60	0,3	80
[5000-11000]	0,6	70	0,5	70	0,5	60	-	-
[5000-11000]	0,6	80	0,5	80	0,5	70	-	-
[5000-11000]	0,7	70	0,6	70	0,5	80	-	-
[5000-12000]	0,5	50	0,4	60	0,3	70	-	-
[5000-12000]	0,5	60	0,4	70	0,3	80	-	-
[5000-12000]	0,5	70	0,5	60	0,4	70	-	-
[5000-12000]	0,6	50	0,5	70	0,4	80	-	-
[5000-12000]	0,6	60	0,5	80	-	-	-	-
[5000-12000]	0,6	70	-	-	-	-	-	-
[5000-12000]	0,6	80	-	-	-	-	-	-
[5000-12000]	0,7	60	-	-	-	-	-	-
[5000-12000]	0,7	70	-	-	-	-	-	-
[5000-13000]	0,4	40	0,4	60	-	-	-	-
[5000-13000]	0,5	60	0,5	60	-	-	-	-
[5000-13000]	0,5	70	0,5	70	-	-	-	-
[5000-13000]	0,5	80	0,5	80	-	-	-	-
[5000-13000]	0,6	70	-	-	-	-	-	-
[5000-14000]	0,4	60	-	-	-	-	-	-
[5000-14000]	0,4	70	-	-	-	-	-	-
[5000-14000]	0,4	80	-	-	-	-	-	-
[5000-14000]	0,5	70	-	-	-	-	-	-
[6000-7000]	0,8	40	0,7	60	0,7	50	0,7	50
[6000-7000]	0,8	50	0,7	70	0,7	60	0,7	60
[6000-7000]	0,8	60	0,8	30	0,8	30	0,7	70
[6000-7000]	0,9	30	0,8	40	0,8	40	0,8	40
[6000-7000]	0,9	40	0,8	50	0,8	50	0,8	50
[6000-7000]	0,9	50	0,8	60	0,8	60	0,8	60
[6000-7000]	0,9	60	0,8	70	0,8	70	0,8	70
[6000-7000]	0,9	70	0,8	80	0,8	80	0,8	80
[6000-7000]	0,9	80	0,9	30	0,9	30	0,9	30
[6000-7000]	1	30	0,9	40	0,9	40	0,9	40
[6000-7000]	1	40	0,9	50	0,9	50	0,9	50

[6000-7000]	1	50	0,9	60	0,9	60	0,9	60
[6000-7000]	1	60	0,9	70	0,9	70	0,9	70
[6000-7000]	1	70	0,9	80	0,9	80	0,9	80
[6000-7000]	1	80	1	30	1	30	1	40
[6000-7000]	1,1	30	1	40	1	40	1	50
[6000-7000]	1,1	40	1	50	1	50	1	60
[6000-7000]	1,1	50	1	60	1	60	-	-
[6000-7000]	-	-	1	70	-	-	-	-
[6000-7000]	-	-	1,1	40	-	-	-	-
[6000-7000]	-	-	1,1	50	-	-	-	-
[6000-7000]	-	-	1,1	60	-	-	-	-
[6000-8000]	0,7	50	0,7	50	0,7	40	0,7	50
[6000-8000]	0,7	60	0,7	60	0,7	50	0,7	60
[6000-8000]	0,7	70	0,7	70	0,7	60	0,7	70
[6000-8000]	0,8	30	0,8	30	0,7	70	0,7	80
[6000-8000]	0,8	40	0,8	40	0,8	80	0,8	40
[6000-8000]	0,8	50	0,8	50	0,8	40	0,8	50
[6000-8000]	0,8	60	0,8	60	0,8	50	0,8	60
[6000-8000]	0,8	70	0,8	70	0,8	60	0,8	70
[6000-8000]	0,8	80	0,8	80	0,8	70	0,8	80
[6000-8000]	0,9	30	0,9	30	0,9	80	0,9	50
[6000-8000]	0,9	40	0,9	40	0,9	40	0,9	60
[6000-8000]	0,9	50	0,9	50	0,9	50	-	-
[6000-8000]	0,9	60	0,9	60	0,9	60	-	-
[6000-8000]	0,9	70	0,9	70	0,9	70	-	-
[6000-8000]	0,9	80	0,9	80	1	40	-	-
[6000-8000]	1	30	1	50	1	50	-	-
[6000-8000]	1	40	1	60	1	60	-	-
[6000-8000]	1	50	1	70	-	-	-	-
[6000-8000]	1	60	1,1	40	-	-	-	-
[6000-8000]	1	70	1,1	50	-	-	-	-
[6000-8000]	1,1	40	1,1	60	-	-	-	-
[6000-8000]	1,1	50	-	-	-	-	-	-
[6000-8000]	1,1	60	-	-	-	-	-	-
[6000-8000]	1,2	40	-	-	-	-	-	-
[6000-8000]	1,2	50	-	-	-	-	-	-
[6000-9000]	0,7	60	0,6	50	0,6	50	0,5	70
[6000-9000]	0,7	70	0,6	60	0,6	60	0,6	60
[6000-9000]	0,8	40	0,6	70	0,6	70	0,6	70
[6000-9000]	0,8	50	0,6	80	0,6	80	0,6	80
[6000-9000]	0,8	60	0,7	40	0,7	40	0,7	50
[6000-9000]	0,8	70	0,7	50	0,7	50	0,7	60
[6000-9000]	0,8	80	0,7	60	0,7	60	0,7	70
[6000-9000]	0,9	40	0,7	70	0,7	70	0,7	80
[6000-9000]	0,9	50	0,7	80	0,7	80	0,8	60
[6000-9000]	0,9	60	0,8	50	0,8	40	-	-

[6000-9000]	0,9	70	0,8	60	0,8	50	-	-
[6000-9000]	1	40	0,8	70	0,8	60	-	-
[6000-9000]	1	50	0,8	80	0,8	70	-	-
[6000-9000]	1	60	0,9	40	0,8	80	-	-
[6000-9000]	-	-	0,9	50	0,9	50	-	-
[6000-9000]	-	-	0,9	60	0,9	60	-	-
[6000-9000]	-	-	0,9	70	0,9	70	-	-
[6000-9000]	-	-	1	50	-	-	-	-
[6000-9000]	-	-	1	60	-	-	-	-
[6000-10000]	0,7	50	0,6	70	0,5	60	0,5	60
[6000-10000]	0,7	60	0,7	50	0,5	70	0,5	70
[6000-10000]	0,7	70	0,7	60	0,6	50	0,5	80
[6000-10000]	0,8	40	0,7	70	0,6	60	-	-
[6000-10000]	0,8	50	0,7	80	0,6	70	-	-
[6000-10000]	0,8	60	0,8	60	0,6	80	-	-
[6000-10000]	0,8	70	0,8	70	0,7	60	-	-
[6000-10000]	0,9	50	-	-	0,7	70	-	-
[6000-10000]	0,9	60	-	-	-	-	-	-
[6000-10000]	0,9	70	-	-	-	-	-	-
[6000-11000]	0,6	50	0,5	70	0,4	70	0,4	70
[6000-11000]	0,6	60	0,6	60	0,5	60	0,5	70
[6000-11000]	0,6	70	0,6	70	0,5	70	0,5	80
[6000-11000]	0,6	80	0,6	80	0,5	80	-	-
[6000-11000]	0,7	40	0,7	70	0,6	50	-	-
[6000-11000]	0,7	50	-	-	0,6	60	-	-
[6000-11000]	0,7	60	-	-	0,6	70	-	-
[6000-11000]	0,7	70	-	-	0,7	60	-	-
[6000-11000]	0,7	80	-	-	-	-	-	-
[6000-11000]	0,8	50	-	-	-	-	-	-
[6000-11000]	0,8	60	-	-	-	-	-	-
[6000-11000]	0,8	70	-	-	-	-	-	-
[6000-11000]	0,9	60	-	-	-	-	-	-
[6000-12000]	0,6	50	0,5	60	0,4	70	-	-
[6000-12000]	0,6	60	0,5	70	0,4	80	-	-
[6000-12000]	0,6	70	0,6	50	0,5	60	-	-
[6000-12000]	0,7	60	0,6	60	0,5	70	-	-
[6000-12000]	0,7	70	0,6	70	0,5	80	-	-
[6000-12000]	-	-	0,6	80	-	-	-	-
[6000-12000]	-	-	0,7	70	-	-	-	-
[6000-13000]	0,4	60	0,4	60	-	-	-	-
[6000-13000]	0,4	70	0,5	60	-	-	-	-
[6000-13000]	0,5	60	0,5	70	-	-	-	-
[6000-13000]	0,5	70	0,5	80	-	-	-	-
[6000-13000]	0,5	80	-	-	-	-	-	-
[6000-14000]	0,4	60	-	-	-	-	-	-
[6000-14000]	0,4	70	-	-	-	-	-	-

[6000-14000]	0,4	80	-	-	-	-	-	-
[6000-14000]	0,5	60	-	-	-	-	-	-
[6000-14000]	0,5	70	-	-	-	-	-	-
[6000-14000]	0,5	80	-	-	-	-	-	-
[7000-8000]	0,8	30	0,8	40	0,7	40	0,7	50
[7000-8000]	0,8	40	0,8	50	0,7	50	0,7	60
[7000-8000]	0,8	50	0,8	60	0,7	60	0,7	70
[7000-8000]	0,8	60	0,8	70	0,7	70	0,8	30
[7000-8000]	0,8	70	0,8	80	0,8	30	0,8	40
[7000-8000]	0,9	30	0,9	30	0,8	40	0,8	50
[7000-8000]	0,9	40	0,9	40	0,8	50	0,8	60
[7000-8000]	0,9	50	0,9	50	0,8	60	0,8	70
[7000-8000]	0,9	60	0,9	60	0,8	70	0,8	80
[7000-8000]	0,9	70	0,9	70	0,8	80	0,9	30
[7000-8000]	0,9	80	0,9	80	0,9	30	0,9	40
[7000-8000]	1	30	1	30	0,9	40	0,9	50
[7000-8000]	1	40	1	40	0,9	50	0,9	60
[7000-8000]	1	50	1	50	0,9	60	0,9	70
[7000-8000]	1	60	1	60	0,9	70	-	-
[7000-8000]	1	70	1	70	0,9	80	-	-
[7000-8000]	1	80	-	-	1	30	-	-
[7000-8000]	1,1	50	-	-	1	40	-	-
[7000-8000]	-	-	-	-	1	50	-	-
[7000-8000]	-	-	-	-	1	60	-	-
[7000-8000]	-	-	-	-	1	70	-	-
[7000-8000]	-	-	-	-	1,1	40	-	-
[7000-8000]	-	-	-	-	1,1	50	-	-
[7000-9000]	0,7	60	0,7	50	0,7	50	0,7	40
[7000-9000]	0,8	40	0,7	60	0,7	60	0,7	50
[7000-9000]	0,8	50	0,7	70	0,7	70	0,7	60
[7000-9000]	0,8	60	0,8	30	0,8	40	0,7	70
[7000-9000]	0,8	70	0,8	40	0,8	50	0,7	80
[7000-9000]	0,8	80	0,8	50	0,8	60	0,8	40
[7000-9000]	0,9	30	0,8	60	0,8	70	0,8	50
[7000-9000]	0,9	40	0,8	70	0,8	80	0,8	60
[7000-9000]	0,9	50	0,8	80	0,9	40	0,8	70
[7000-9000]	0,9	60	0,9	30	0,9	50	-	-
[7000-9000]	0,9	70	0,9	40	0,9	60	-	-
[7000-9000]	0,9	80	0,9	50	0,9	70	-	-
[7000-9000]	1	30	0,9	60	1	50	-	-
[7000-9000]	1	40	0,9	70	1	60	-	-
[7000-9000]	1	50	0,9	80	-	-	-	-
[7000-9000]	1	60	1	40	-	-	-	-
[7000-9000]	1	70	1	50	-	-	-	-
[7000-9000]	1,1	40	1	60	-	-	-	-
[7000-9000]	1,1	50	-	-	-	-	-	-

[7000-9000]	1,1	60	-	-	-	-	-	-
[7000-10000]	0,7	50	0,6	50	0,6	50	0,5	70
[7000-10000]	0,7	60	0,6	60	0,6	60	0,6	50
[7000-10000]	0,8	30	0,6	70	0,6	70	0,6	60
[7000-10000]	0,8	40	0,6	80	0,7	40	0,6	70
[7000-10000]	0,8	50	0,7	50	0,7	50	0,6	80
[7000-10000]	0,8	60	0,7	60	0,7	60	-	-
[7000-10000]	0,8	70	0,7	70	0,7	70	-	-
[7000-10000]	0,9	30	0,7	80	0,7	80	-	-
[7000-10000]	0,9	40	0,8	30	0,8	60	-	-
[7000-10000]	0,9	50	0,8	40	0,8	70	-	-
[7000-10000]	0,9	60	0,8	50	-	-	-	-
[7000-10000]	0,9	70	0,8	60	-	-	-	-
[7000-10000]	1	40	0,8	70	-	-	-	-
[7000-10000]	1	50	0,9	40	-	-	-	-
[7000-10000]	1	60	0,9	50	-	-	-	-
[7000-10000]	1,1	50	0,9	60	-	-	-	-
[7000-10000]	-	-	0,9	70	-	-	-	-
[7000-10000]	-	-	1	50	-	-	-	-
[7000-11000]	0,7	50	0,6	60	0,5	50	0,5	60
[7000-11000]	0,7	60	0,6	70	0,5	60	0,5	70
[7000-11000]	0,7	70	0,6	80	0,5	70	0,5	80
[7000-11000]	0,7	80	0,7	50	0,5	80	0,6	70
[7000-11000]	0,8	50	0,7	60	0,6	50	-	-
[7000-11000]	0,8	60	0,7	70	0,6	60	-	-
[7000-11000]	0,8	70	0,7	80	0,6	70	-	-
[7000-11000]	0,8	80	-	-	0,6	80	-	-
[7000-11000]	0,9	60	-	-	0,7	40	-	-
[7000-11000]	-	-	-	-	0,7	50	-	-
[7000-11000]	-	-	-	-	0,7	60	-	-
[7000-11000]	-	-	-	-	0,7	70	-	-
[7000-11000]	-	-	-	-	0,8	50	-	-
[7000-11000]	-	-	-	-	0,8	60	-	-
[7000-12000]	0,6	60	0,6	50	0,5	60	-	-
[7000-12000]	0,6	70	0,6	60	0,5	70	-	-
[7000-12000]	0,6	80	0,6	70	0,5	80	-	-
[7000-12000]	0,7	60	0,6	80	0,6	60	-	-
[7000-12000]	0,7	70	0,7	60	0,6	70	-	-
[7000-12000]			0,7	70	-	-	-	-
[7000-13000]	0,4	60	0,5	60	-	-	-	-
[7000-13000]	0,4	70	0,5	70	-	-	-	-
[7000-13000]	0,5	60	0,5	80	-	-	-	-
[7000-13000]	0,5	70	-	-	-	-	-	-
[7000-13000]	0,5	80	-	-	-	-	-	-
[7000-13000]	0,6	50	-	-	-	-	-	-
[7000-13000]	0,6	60	-	-	-	-	-	-

[7000-13000]	0,6	70	-	-	-	-	-	-
[7000-13000]	0,6	80	-	-	-	-	-	-
[7000-14000]	0,5	50	-	-	-	-	-	-
[7000-14000]	0,5	60	-	-	-	-	-	-
[7000-14000]	0,5	70	-	-	-	-	-	-
[7000-14000]	0,5	80	-	-	-	-	-	-
[7000-14000]	0,6	60	-	-	-	-	-	-
[7000-14000]	0,6	70	-	-	-	-	-	-
[7000-14000]	0,6	80	-	-	-	-	-	-
[8000-9000]	0,8	50	0,7	50	0,7	50	0,7	50
[8000-9000]	0,8	60	0,7	60	0,7	60	0,7	60
[8000-9000]	0,8	70	0,8	30	0,7	70	0,7	70
[8000-9000]	0,9	30	0,8	40	0,8	30	0,8	30
[8000-9000]	0,9	40	0,8	50	0,8	40	0,8	40
[8000-9000]	0,9	50	0,8	60	0,8	50	0,8	50
[8000-9000]	0,9	60	0,8	70	0,8	60	0,8	60
[8000-9000]	0,9	70	0,8	80	0,8	70	0,8	70
[8000-9000]	0,9	80	0,9	30	0,8	80	0,9	40
[8000-9000]	1	30	0,9	40	0,9	40	0,9	50
[8000-9000]	1	40	0,9	50	0,9	50	0,9	60
[8000-9000]	1	50	0,9	60	0,9	60	0,9	70
[8000-9000]	1	60	0,9	70	0,9	70	-	-
[8000-9000]	1	70	0,9	80	1	30	-	-
[8000-9000]	1	80	1	40	1	40	-	-
[8000-9000]	1,1	30	1	50	1	50	-	-
[8000-9000]	1,1	40	1	60	1	60	-	-
[8000-9000]	1,1	50	1	70	1	70	-	-
[8000-9000]	1,1	60	-	-	1,1	40	-	-
[8000-9000]	-	-	-	-	1,1	50	-	-
[8000-10000]	0,8	40	0,7	50	0,7	50	0,6	60
[8000-10000]	0,8	50	0,7	60	0,7	60	0,6	70
[8000-10000]	0,8	60	0,7	70	0,7	70	0,6	80
[8000-10000]	0,8	70	0,7	80	0,8	30	0,7	40
[8000-10000]	0,8	80	0,8	40	0,8	40	0,7	50
[8000-10000]	0,9	30	0,8	50	0,8	50	0,7	60
[8000-10000]	0,9	40	0,8	60	0,8	60	0,7	70
[8000-10000]	0,9	50	0,8	70	0,8	70	0,7	80
[8000-10000]	0,9	60	0,8	80	0,8	80	-	-
[8000-10000]	0,9	70	0,9	40	0,9	40	-	-
[8000-10000]	0,9	80	0,9	50	0,9	50	-	-
[8000-10000]	1	40	0,9	60	0,9	60	-	-
[8000-10000]	1	50	0,9	70	0,9	70	-	-
[8000-10000]	1	60	0,9	80	1	60	-	-
[8000-10000]	-	-	1	30	1	50	-	-
[8000-10000]	-	-	1	40	-	-	-	-
[8000-10000]	-	-	1	50	-	-	-	-

[8000-10000]	-	-	1	60	-	-	-	-
[8000-10000]	-	-	1	70	-	-	-	-
[8000-10000]	-	-	1,1	50	-	-	-	-
[8000-11000]	0,8	50	0,7	60	0,6	50	0,4	70
[8000-11000]	0,8	60	0,7	70	0,6	60	0,4	80
[8000-11000]	0,8	70	0,7	80	0,6	70	0,5	60
[8000-11000]	0,9	40	0,8	40	0,6	80	0,5	70
[8000-11000]	0,9	50	0,8	50	0,7	40	0,5	80
[8000-11000]	0,9	60	0,8	60	0,7	50	-	-
[8000-11000]	0,9	70	0,8	70	0,7	60	-	-
[8000-11000]	1	50	0,8	80	0,7	70	-	-
[8000-11000]	1	60	0,9	60	0,7	80	-	-
[8000-11000]	-	-	0,9	70	0,8	50	-	-
[8000-11000]	-	-	-	-	0,8	60	-	-
[8000-12000]	0,7	50	0,6	50	0,4	60	-	-
[8000-12000]	0,7	60	0,6	60	0,4	70	-	-
[8000-12000]	0,7	70	0,6	70	0,4	80	-	-
[8000-12000]	0,7	80	0,6	80	0,5	50	-	-
[8000-12000]	0,8	60	0,7	70	0,5	60	-	-
[8000-12000]	0,8	70	-	-	0,5	70	-	-
[8000-12000]	-	-	-	-	0,5	80	-	-
[8000-12000]	-	-	-	-	0,6	70	-	-
[8000-13000]	0,6	60	0,4	60	-	-	-	-
[8000-13000]	0,6	70	0,4	70	-	-	-	-
[8000-13000]	0,6	80	0,4	80	-	-	-	-
[8000-14000]	0,5	70	-	-	-	-	-	-
[8000-14000]	0,5	80	-	-	-	-	-	-
[8000-14000]	0,6	70	-	-	-	-	-	-
[8000-14000]	0,6	80	-	-	-	-	-	-
[9000-10000]	0,8	30	0,8	30	0,8	30	0,7	50
[9000-10000]	0,8	40	0,8	40	0,8	40	0,7	60
[9000-10000]	0,8	50	0,8	50	0,8	50	0,7	70
[9000-10000]	0,8	60	0,8	60	0,8	60	0,8	30
[9000-10000]	0,8	70	0,8	70	0,8	70	0,8	40
[9000-10000]	0,9	30	0,8	80	0,8	80	0,8	50
[9000-10000]	0,9	40	0,9	30	0,9	30	0,8	60
[9000-10000]	0,9	50	0,9	40	0,9	40	0,8	70
[9000-10000]	0,9	60	0,9	50	0,9	50	0,8	80
[9000-10000]	0,9	70	0,9	60	0,9	60	0,9	50
[9000-10000]	0,9	80	0,9	70	0,9	70	0,9	60
[9000-10000]	1	30	0,9	80	0,9	80	-	-
[9000-10000]	1	40	-	-	1	50	-	-
[9000-10000]	1	50	-	-	1	60	-	-
[9000-10000]	1	60	-	-	-	-	-	-
[9000-10000]	1	70	-	-	-	-	-	-
[9000-10000]	1	80	-	-	-	-	-	-

[9000-10000]	1,1	30	-	-	-	-	-	-
[9000-10000]	1,1	40	-	-	-	-	-	-
[9000-10000]	1,1	50	-	-	-	-	-	-
[9000-10000]	1,1	60	-	-	-	-	-	-
[9000-11000]	0,7	50	0,7	60	0,6	60	0,5	60
[9000-11000]	0,7	60	0,7	70	0,7	40	0,5	70
[9000-11000]	0,7	70	0,8	40	0,7	50	0,6	40
[9000-11000]	0,8	40	0,8	50	0,7	60	0,6	50
[9000-11000]	0,8	50	0,8	60	0,7	70	0,6	60
[9000-11000]	0,8	60	0,8	70	0,7	80	0,6	70
[9000-11000]	0,8	70	0,8	80	0,8	30	0,6	80
[9000-11000]	0,9	30	0,9	40	0,8	40	0,7	50
[9000-11000]	0,9	40	0,9	50	0,8	50	0,7	60
[9000-11000]	0,9	50	0,9	60	0,8	60	0,7	70
[9000-11000]	0,9	60	0,9	70	0,8	70	-	-
[9000-11000]	0,9	70	1	50	0,8	80	-	-
[9000-11000]	0,9	80	1	60	0,9	50	-	-
[9000-11000]	1	30	-	-	0,9	60	-	-
[9000-11000]	1	40	-	-	0,9	70	-	-
[9000-11000]	1	50	-	-	-	-	-	-
[9000-11000]	1	60	-	-	-	-	-	-
[9000-11000]	1	70	-	-	-	-	-	-
[9000-11000]	1,1	50	-	-	-	-	-	-
[9000-11000]	1,1	60	-	-	-	-	-	-
[9000-12000]	0,6	60	0,6	60	0,5	60	-	-
[9000-12000]	0,7	40	0,6	70	0,5	70	-	-
[9000-12000]	0,7	50	0,7	40	0,6	40	-	-
[9000-12000]	0,7	60	0,7	50	0,6	50	-	-
[9000-12000]	0,7	70	0,7	60	0,6	60	-	-
[9000-12000]	0,7	80	0,7	70	0,6	70	-	-
[9000-12000]	0,8	50	0,7	80	0,6	80	-	-
[9000-12000]	0,8	60	0,8	50	0,7	60	-	-
[9000-12000]	0,8	70	0,8	60	0,7	70	-	-
[9000-12000]	0,8	80	0,8	70	0,7	80	-	-
[9000-12000]			0,8	80	-	-	-	-
[9000-13000]	0,6	60	0,5	60	-	-	-	-
[9000-13000]	0,6	70	0,5	70	-	-	-	-
[9000-13000]	0,7	50	0,5	80	-	-	-	-
[9000-13000]	0,7	60	0,6	70	-	-	-	-
[9000-13000]	0,7	70	0,6	80	-	-	-	-
[9000-13000]	0,7	80	-	-	-	-	-	-
[9000-13000]	0,8	70	-	-	-	-	-	-
[9000-14000]	0,5	60	-	-	-	-	-	-
[9000-14000]	0,5	70	-	-	-	-	-	-
[9000-14000]	0,5	80	-	-	-	-	-	-
[10000-11000]	0,8	30	0,8	50	0,6	50	0,7	30

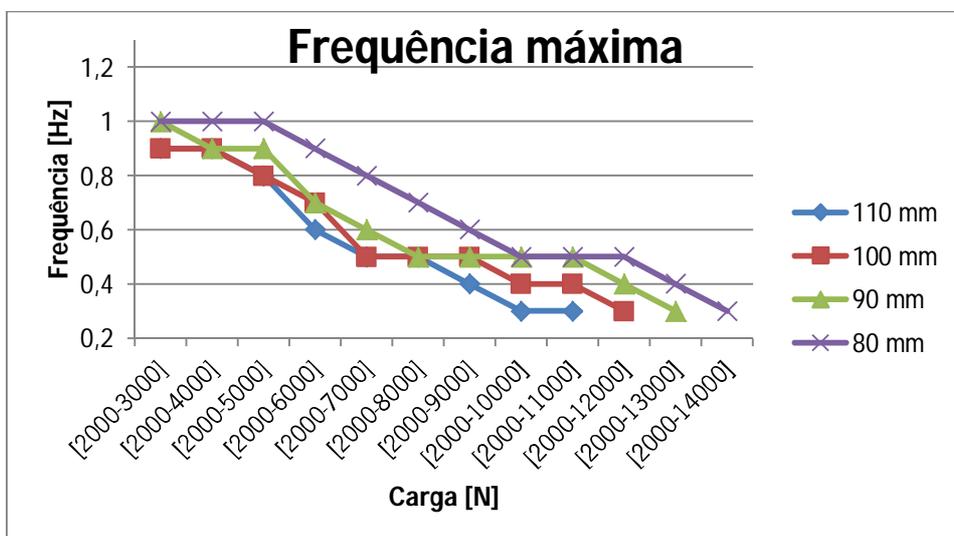
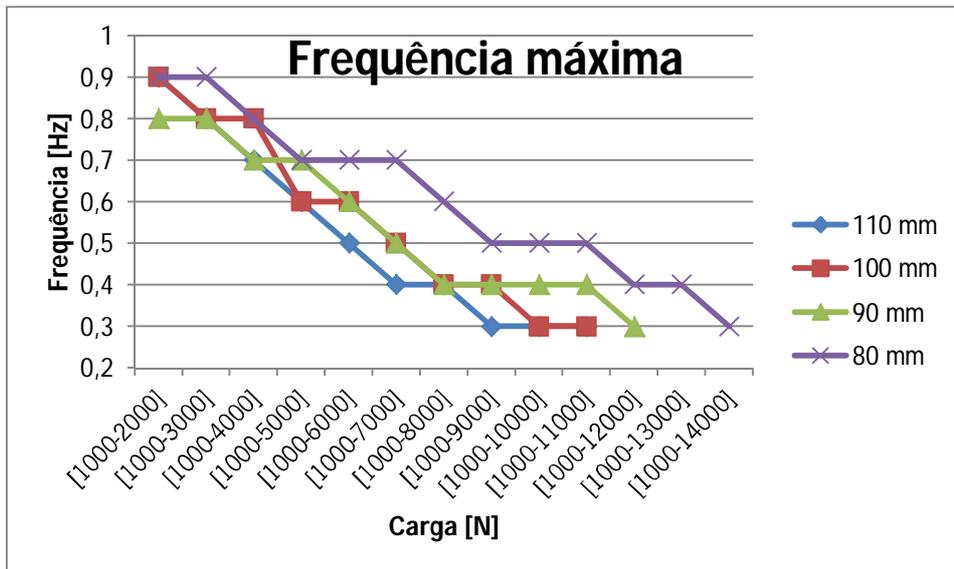
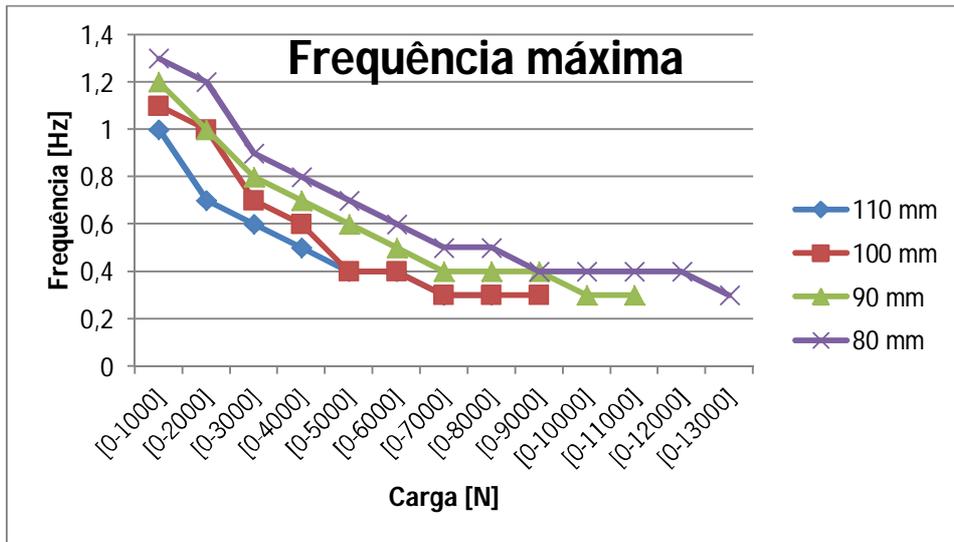
[10000-11000]	0,8	40	0,8	60	0,6	60	0,7	40
[10000-11000]	0,8	50	0,8	70	0,6	70	0,7	50
[10000-11000]	0,8	60	0,9	30	0,7	30	0,7	60
[10000-11000]	0,8	70	0,9	40	0,7	40	0,7	70
[10000-11000]	0,8	80	0,9	50	0,7	50	0,7	80
[10000-11000]	0,9	30	0,9	60	0,7	60	0,8	30
[10000-11000]	0,9	40	0,9	70	0,7	70	0,8	40
[10000-11000]	0,9	50	0,9	80	0,7	80	0,8	50
[10000-11000]	0,9	60	1	30	0,8	30	0,8	60
[10000-11000]	0,9	70	1	40	0,8	40	0,8	70
[10000-11000]	1	40	1	50	0,8	50	-	-
[10000-11000]	1	50	1	60	0,8	60	-	-
[10000-11000]	1	60	1	70	0,8	70	-	-
[10000-11000]	1	70	-	-	0,8	80	-	-
[10000-11000]	1	80	-	-	0,9	50	-	-
[10000-11000]	1,1	50	-	-	0,9	60	-	-
[10000-11000]	1,1	60	-	-	-	-	-	-
[10000-12000]	0,7	50	0,7	50	0,6	60	-	-
[10000-12000]	0,7	60	0,7	60	0,6	70	-	-
[10000-12000]	0,7	70	0,7	70	0,7	30	-	-
[10000-12000]	0,7	80	0,7	80	0,7	40	-	-
[10000-12000]	0,8	30	0,8	30	0,7	50	-	-
[10000-12000]	0,8	40	0,8	40	0,7	60	-	-
[10000-12000]	0,8	50	0,8	50	0,7	70	-	-
[10000-12000]	0,8	60	0,8	60	0,7	80	-	-
[10000-12000]	0,8	70	0,8	70	0,8	30	-	-
[10000-12000]	0,8	80	0,8	80	0,8	40	-	-
[10000-12000]	0,9	50	0,9	60	0,8	50	-	-
[10000-12000]	0,9	60	0,9	70	0,8	60	-	-
[10000-12000]	0,9	70	-	-	0,8	70	-	-
[10000-12000]	-	-	-	-	0,8	80	-	-
[10000-12000]	-	-	-	-	0,9	50	-	-
[10000-12000]	-	-	-	-	0,9	60	-	-
[10000-13000]	0,5	60	0,5	60	-	-	-	-
[10000-13000]	0,5	70	0,5	70	-	-	-	-
[10000-13000]	0,6	50	0,6	40	-	-	-	-
[10000-13000]	0,6	60	0,6	50	-	-	-	-
[10000-13000]	0,6	70	0,6	60	-	-	-	-
[10000-13000]	0,6	80	0,6	70	-	-	-	-
[10000-13000]	0,7	60	0,6	80	-	-	-	-
[10000-13000]	0,7	70	0,7	70	-	-	-	-
[10000-14000]	0,6	50	-	-	-	-	-	-
[10000-14000]	0,6	60	-	-	-	-	-	-
[10000-14000]	0,6	70	-	-	-	-	-	-
[10000-14000]	0,6	80	-	-	-	-	-	-
[10000-14000]	0,7	60	-	-	-	-	-	-

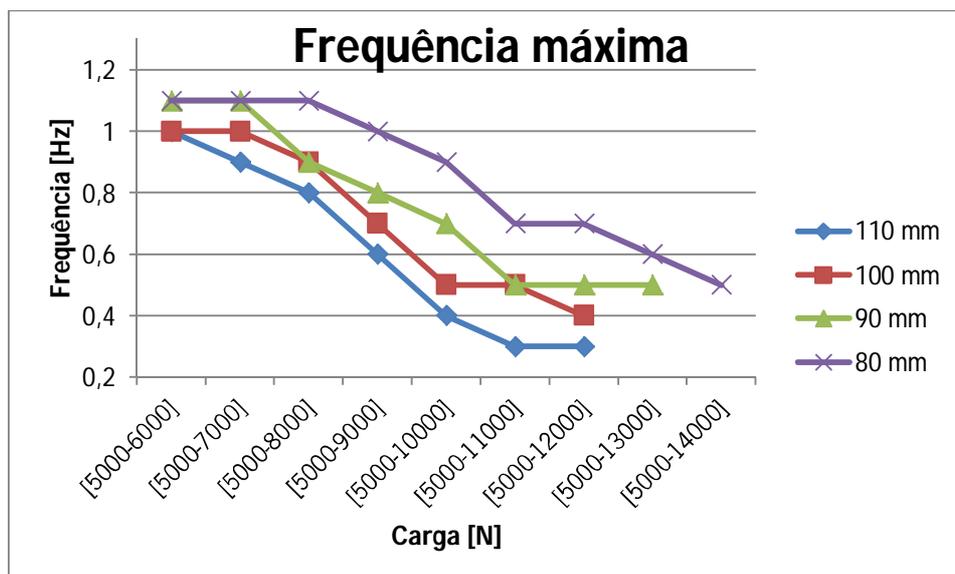
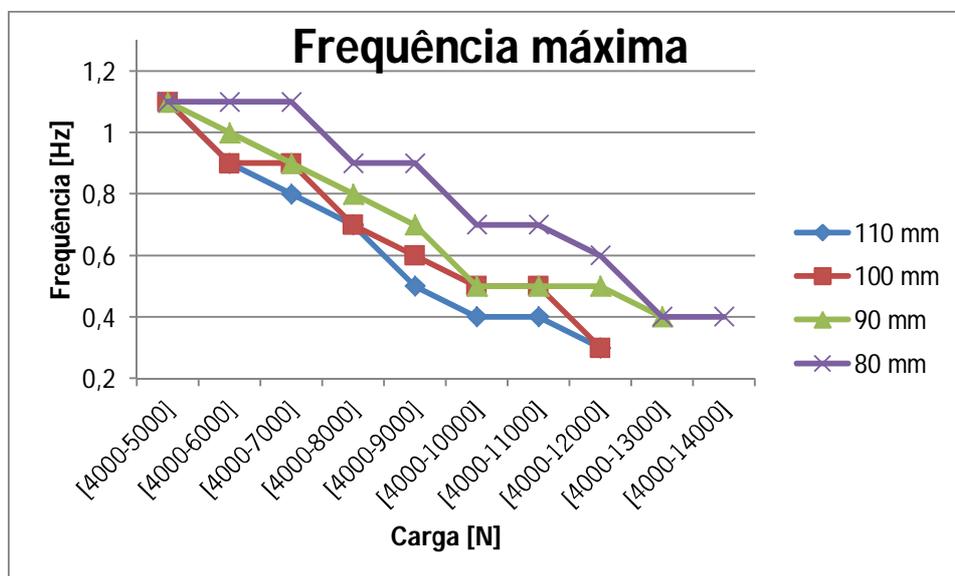
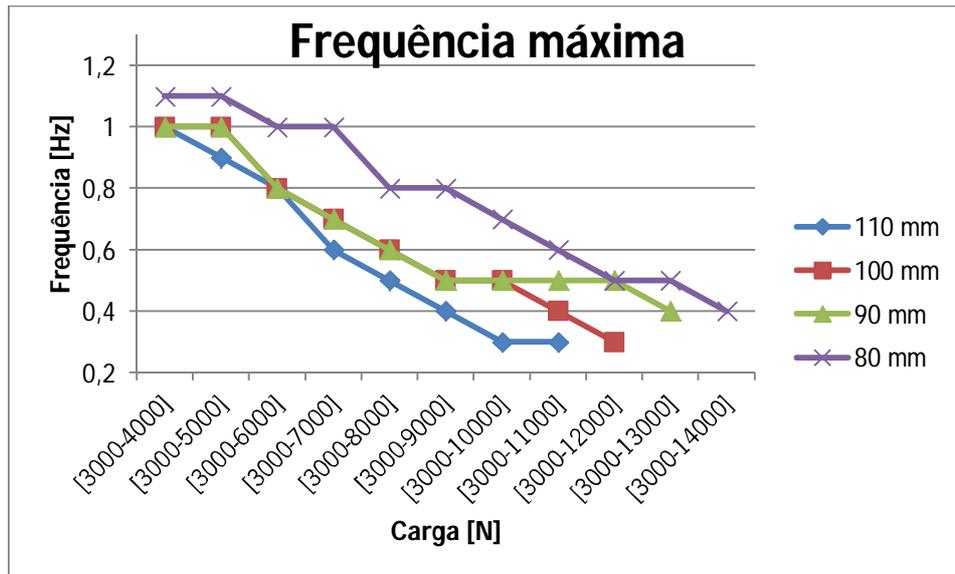
[10000-14000]	0,7	70	-	-	-	-	-	-
[10000-14000]	0,7	80	-	-	-	-	-	-
[11000-12000]	0,8	30	0,8	30	0,6	30	-	-
[11000-12000]	0,8	40	0,8	40	0,6	40	-	-
[11000-12000]	0,8	50	0,8	50	0,6	50	-	-
[11000-12000]	0,8	60	0,8	60	0,6	60	-	-
[11000-12000]	0,8	70	0,8	70	0,6	70	-	-
[11000-12000]	0,9	30	0,8	80	0,6	80	-	-
[11000-12000]	0,9	40	0,9	30	0,7	40	-	-
[11000-12000]	0,9	50	0,9	40	0,7	50	-	-
[11000-12000]	0,9	60	0,9	50	0,7	60	-	-
[11000-12000]	0,9	70	0,9	60	0,7	70	-	-
[11000-12000]	0,9	80	0,9	70	-	-	-	-
[11000-12000]	1	40	0,9	80	-	-	-	-
[11000-12000]	1	50	-	-	-	-	-	-
[11000-12000]	1	60	-	-	-	-	-	-
[11000-12000]	1	70	-	-	-	-	-	-
[11000-13000]	0,7	50	0,6	50	-	-	-	-
[11000-13000]	0,7	60	0,6	60	-	-	-	-
[11000-13000]	0,7	70	0,7	30	-	-	-	-
[11000-13000]	0,7	80	0,7	40	-	-	-	-
[11000-13000]	0,8	30	0,7	50	-	-	-	-
[11000-13000]	0,8	40	0,7	60	-	-	-	-
[11000-13000]	0,8	50	0,7	70	-	-	-	-
[11000-13000]	0,8	60	0,7	80	-	-	-	-
[11000-13000]	0,8	70	0,8	50	-	-	-	-
[11000-13000]	0,8	80	0,8	60	-	-	-	-
[11000-13000]	0,9	40	0,8	70	-	-	-	-
[11000-13000]	0,9	50	-	-	-	-	-	-
[11000-13000]	0,9	60	-	-	-	-	-	-
[11000-13000]	0,9	70	-	-	-	-	-	-
[11000-14000]	0,6	50	-	-	-	-	-	-
[11000-14000]	0,6	60	-	-	-	-	-	-
[11000-14000]	0,6	70	-	-	-	-	-	-
[11000-14000]	0,6	80	-	-	-	-	-	-
[11000-14000]	0,7	50	-	-	-	-	-	-
[11000-14000]	0,7	60	-	-	-	-	-	-
[11000-14000]	0,7	70	-	-	-	-	-	-
[11000-14000]	0,7	80	-	-	-	-	-	-
[11000-14000]	0,8	70	-	-	-	-	-	-
[12000-13000]	0,8	30	0,5	30	-	-	-	-
[12000-13000]	0,8	40	0,5	40	-	-	-	-
[12000-13000]	0,8	50	0,5	50	-	-	-	-
[12000-13000]	0,8	60	0,5	60	-	-	-	-
[12000-13000]	0,8	70	0,5	70	-	-	-	-
[12000-13000]	0,8	80	0,5	80	-	-	-	-

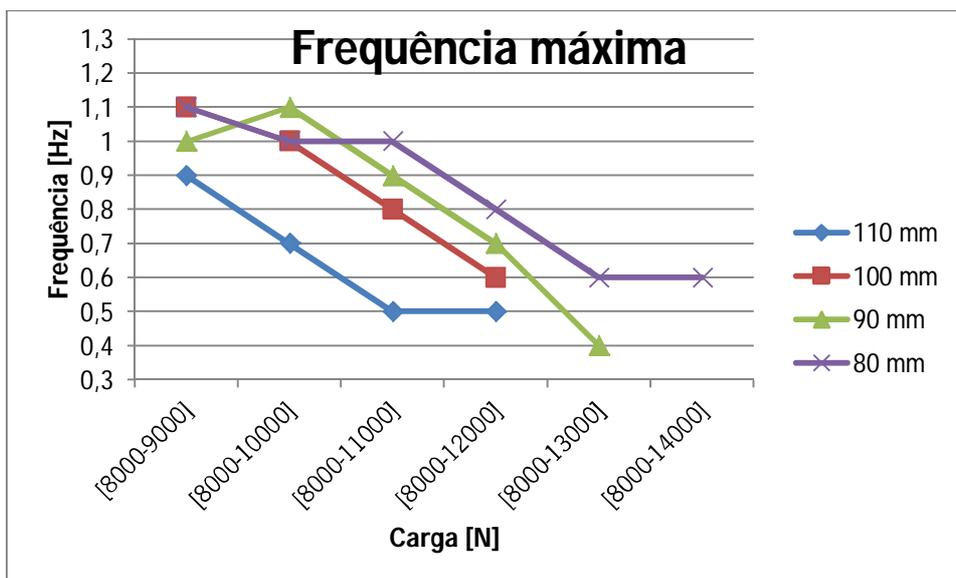
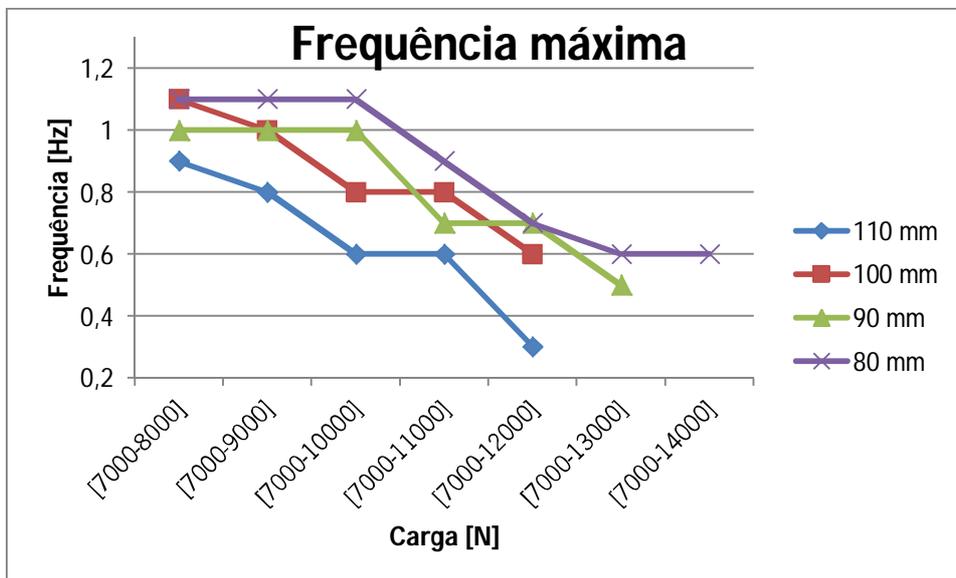
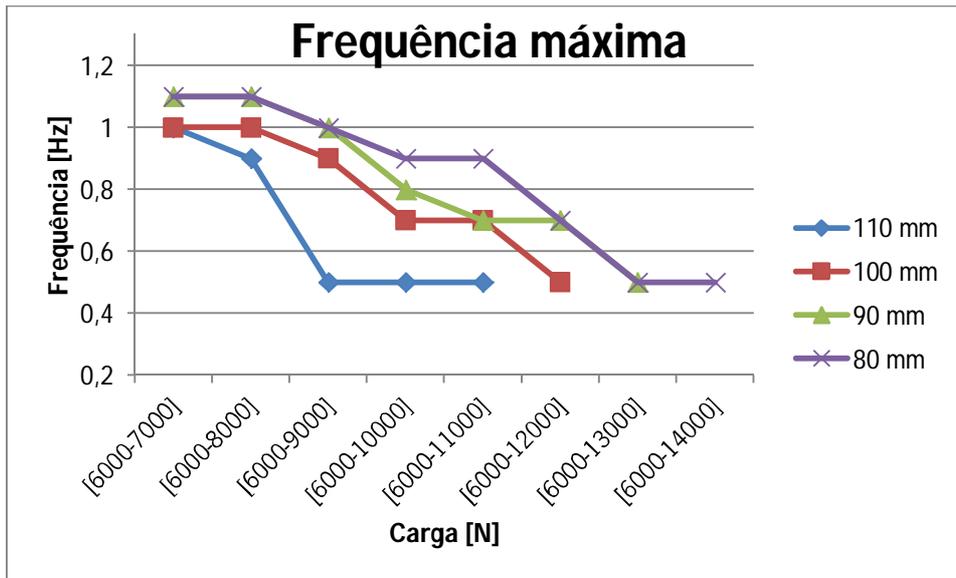
[12000-13000]	0,9	30	0,6	30	-	-	-	-
[12000-13000]	0,9	40	0,6	40	-	-	-	-
[12000-13000]	0,9	50	0,6	50	-	-	-	-
[12000-13000]	0,9	60	0,6	60	-	-	-	-
[12000-13000]	0,9	70	0,6	70	-	-	-	-
[12000-13000]	0,9	80	0,6	80	-	-	-	-
[12000-14000]	0,6	60	-	-	-	-	-	-
[12000-14000]	0,7	40	-	-	-	-	-	-
[12000-14000]	0,7	50	-	-	-	-	-	-
[12000-14000]	0,7	60	-	-	-	-	-	-
[12000-14000]	0,7	70	-	-	-	-	-	-
[12000-14000]	0,7	80	-	-	-	-	-	-
[12000-14000]	0,8	50	-	-	-	-	-	-
[12000-14000]	0,8	60	-	-	-	-	-	-
[12000-14000]	0,8	70	-	-	-	-	-	-
[12000-14000]	0,8	80	-	-	-	-	-	-
[13000-14000]	0,7	40	-	-	-	-	-	-
[13000-14000]	0,7	50	-	-	-	-	-	-
[13000-14000]	0,7	60	-	-	-	-	-	-
[13000-14000]	0,8	30	-	-	-	-	-	-
[13000-14000]	0,8	40	-	-	-	-	-	-
[13000-14000]	0,8	50	-	-	-	-	-	-
[13000-14000]	0,8	60	-	-	-	-	-	-
[13000-14000]	0,8	70	-	-	-	-	-	-
[13000-14000]	0,8	80	-	-	-	-	-	-
[13000-14000]	0,9	50	-	-	-	-	-	-
[13000-14000]	0,9	60	-	-	-	-	-	-

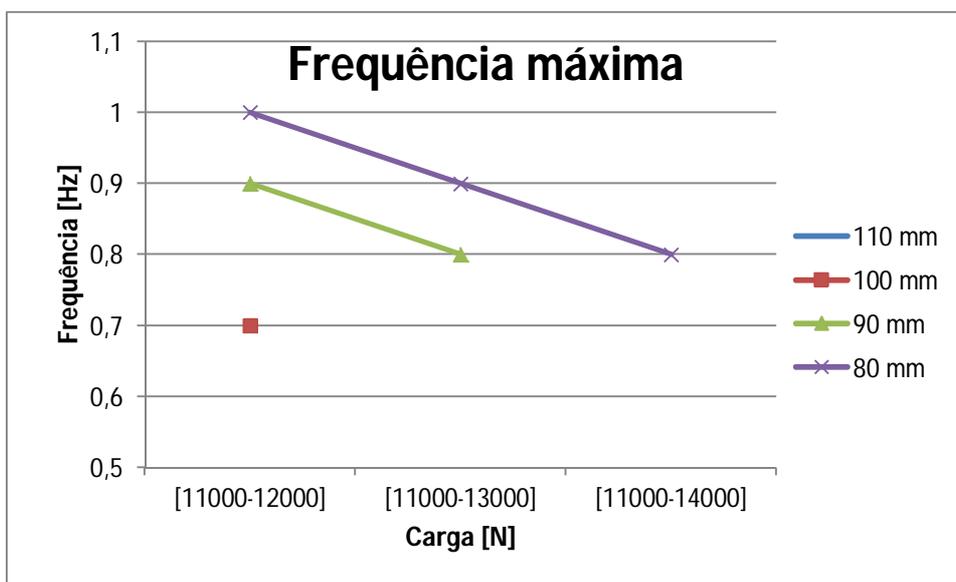
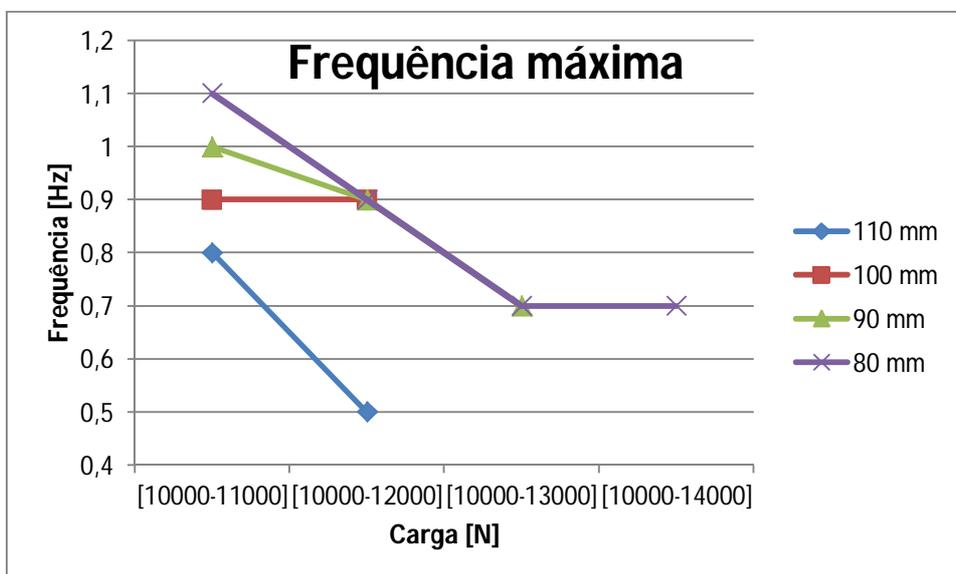
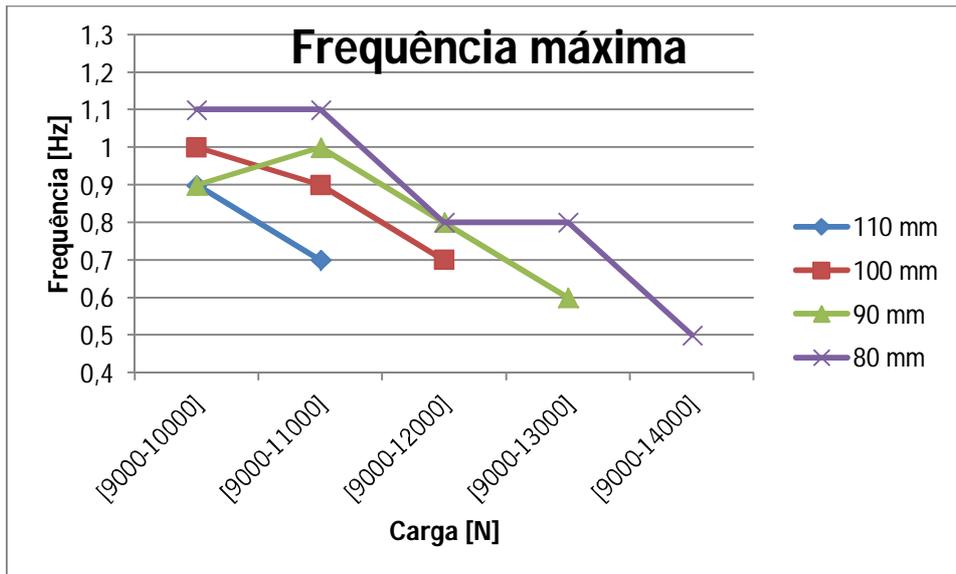


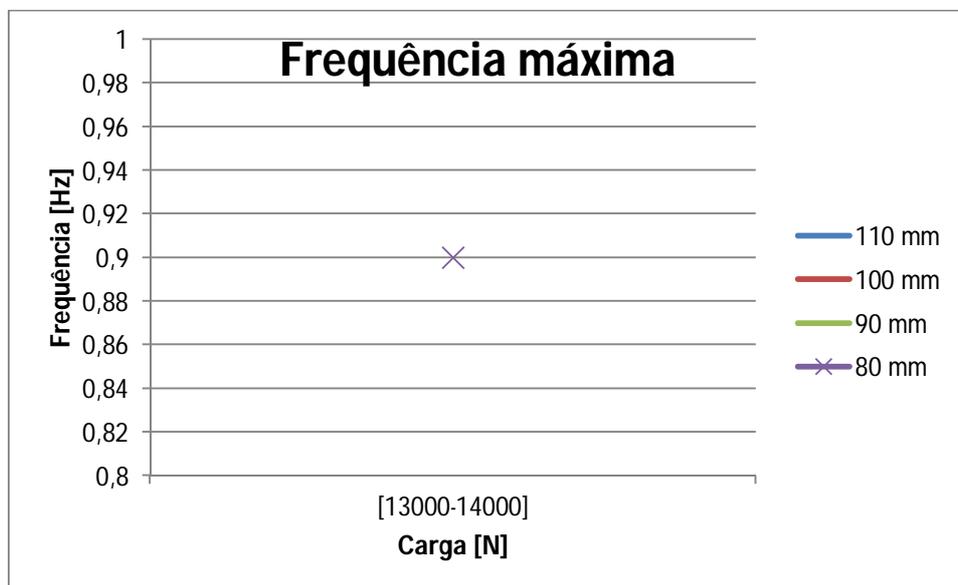
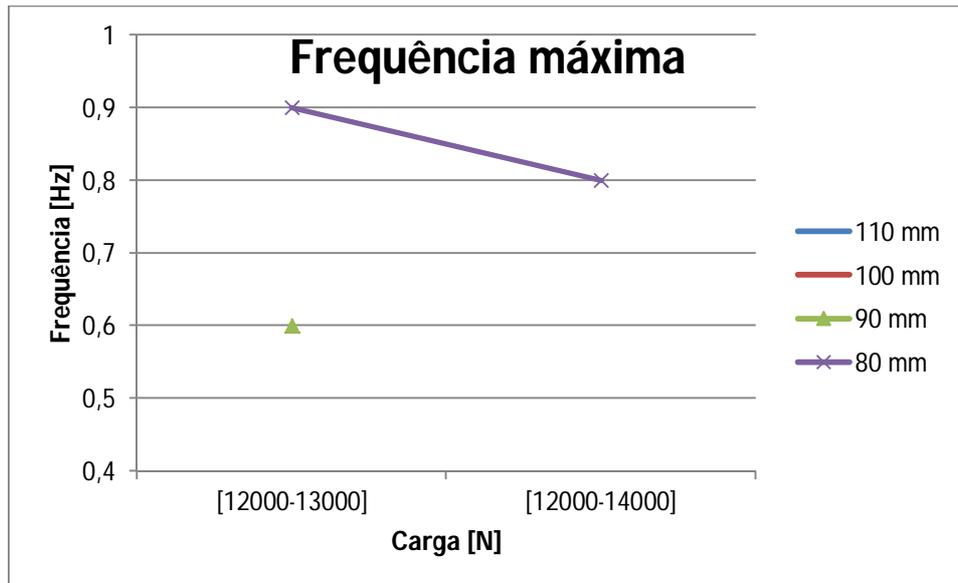
### Anexo F - Gráficos de frequências máximas





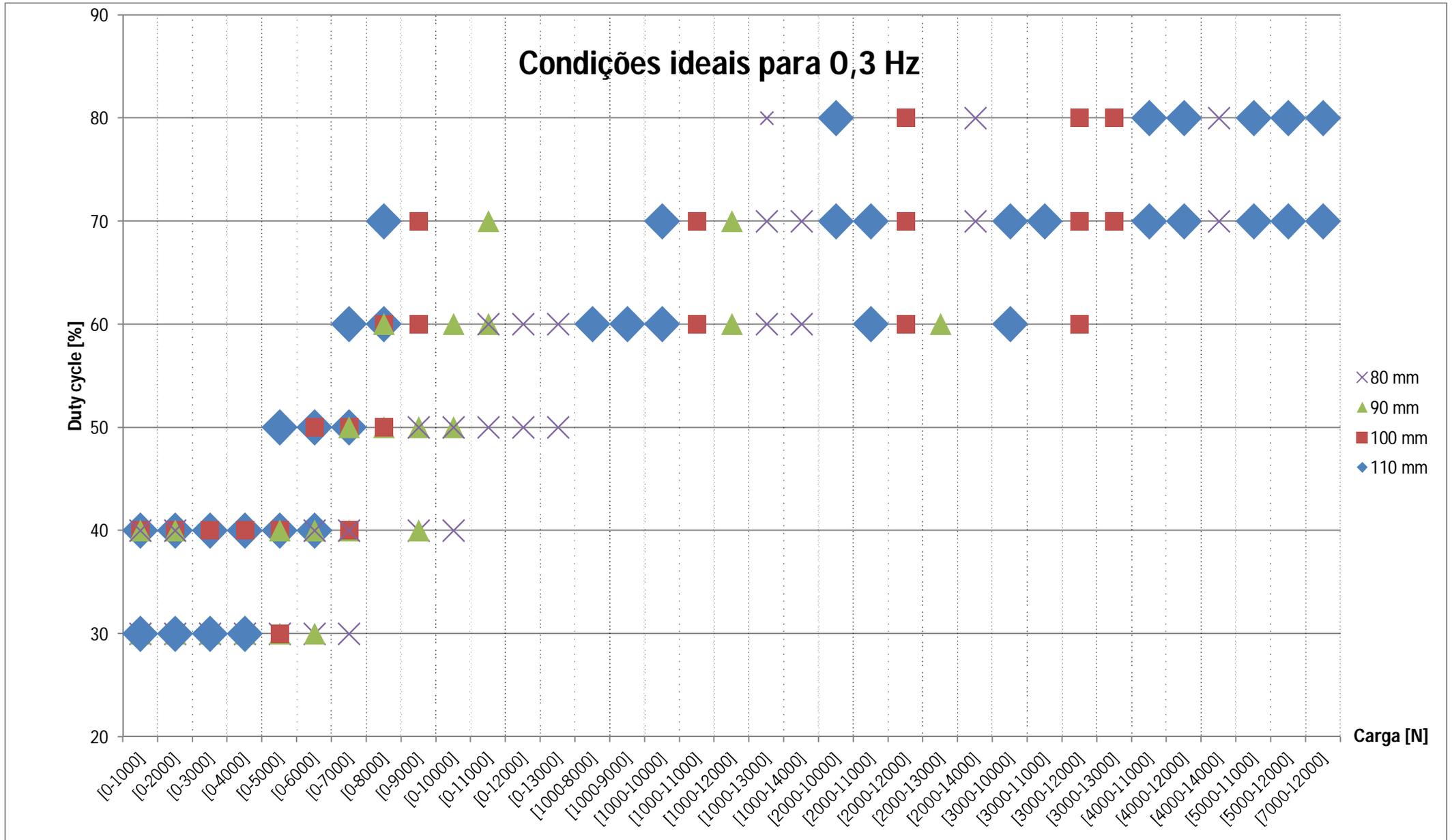


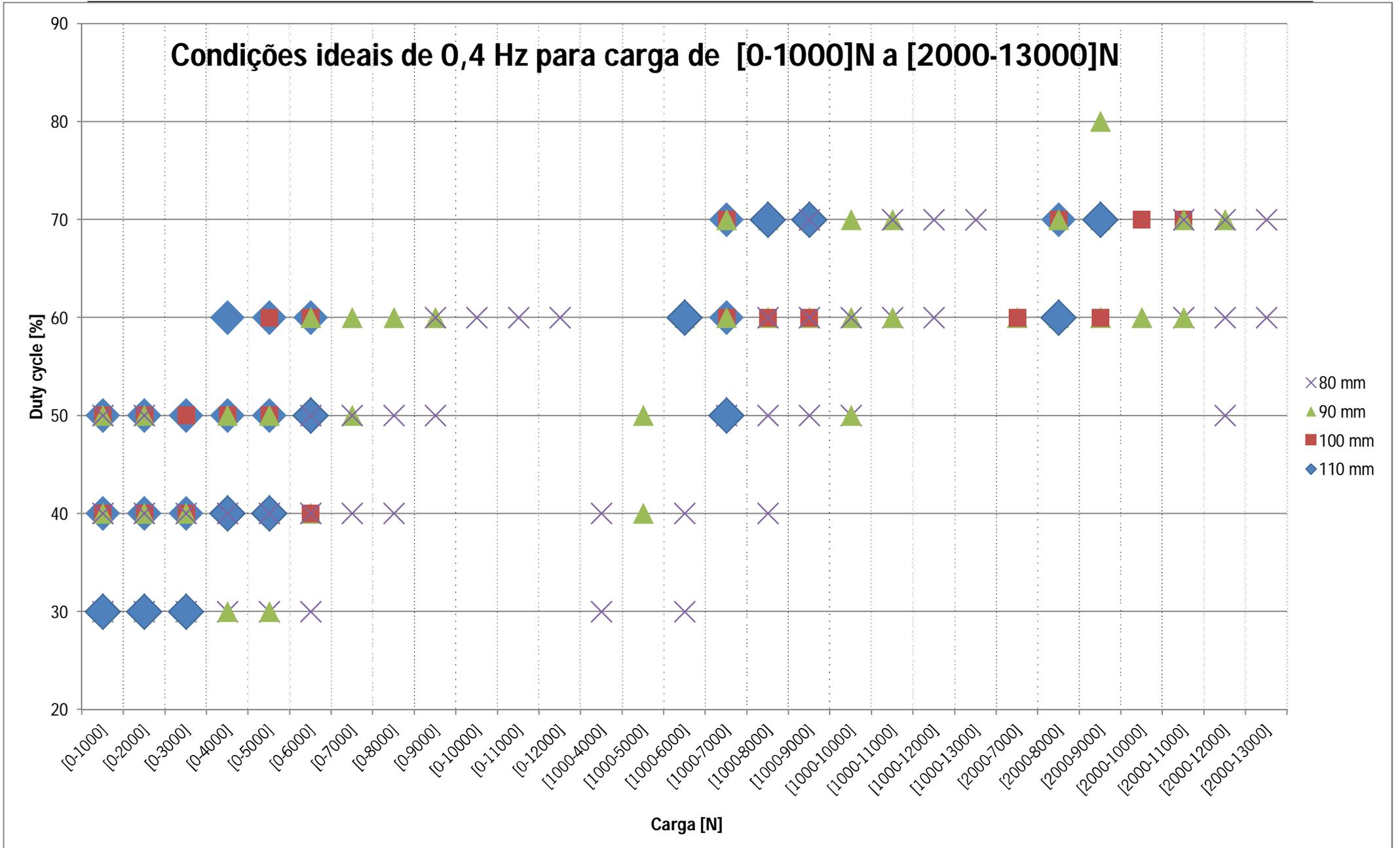


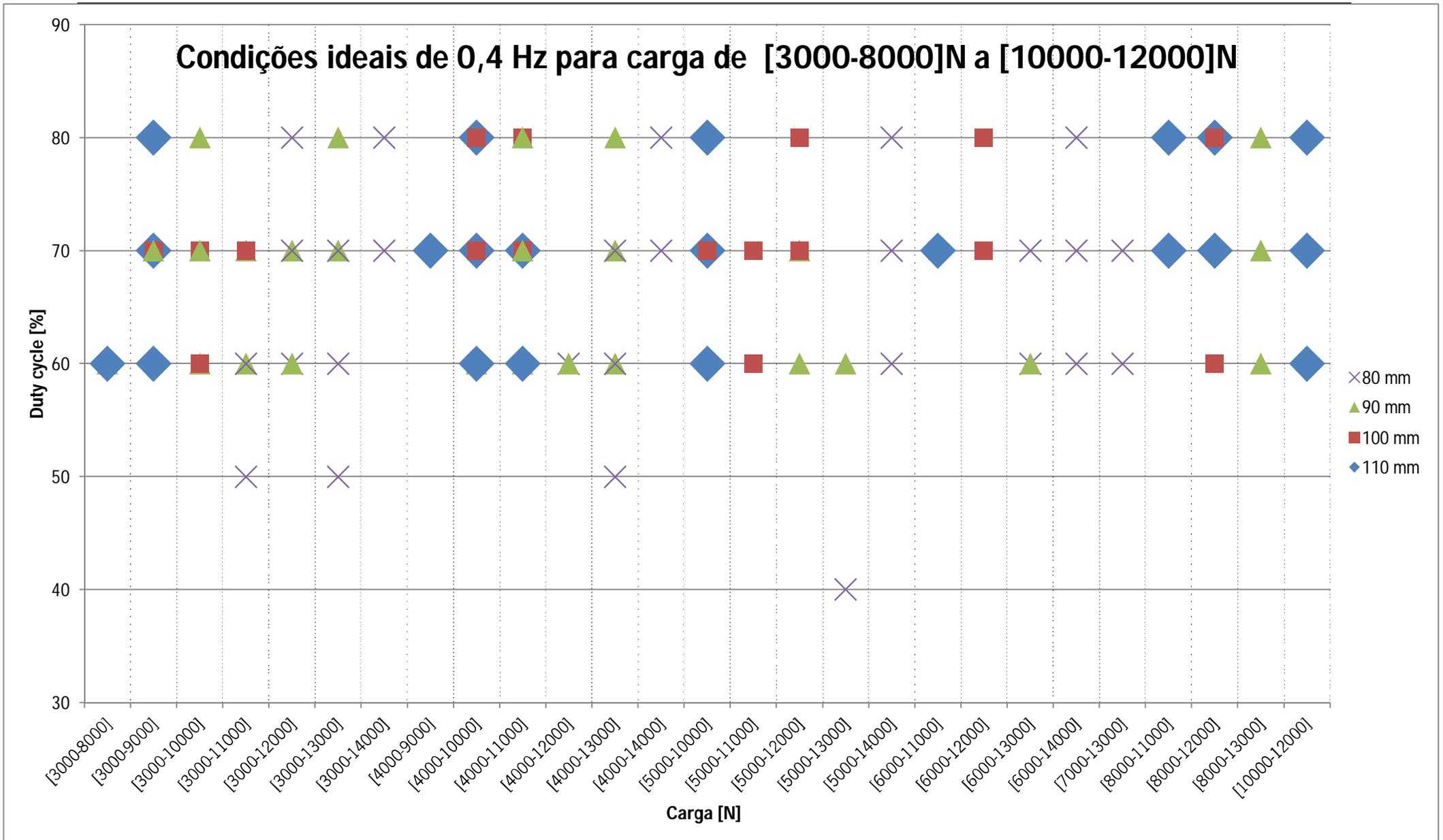


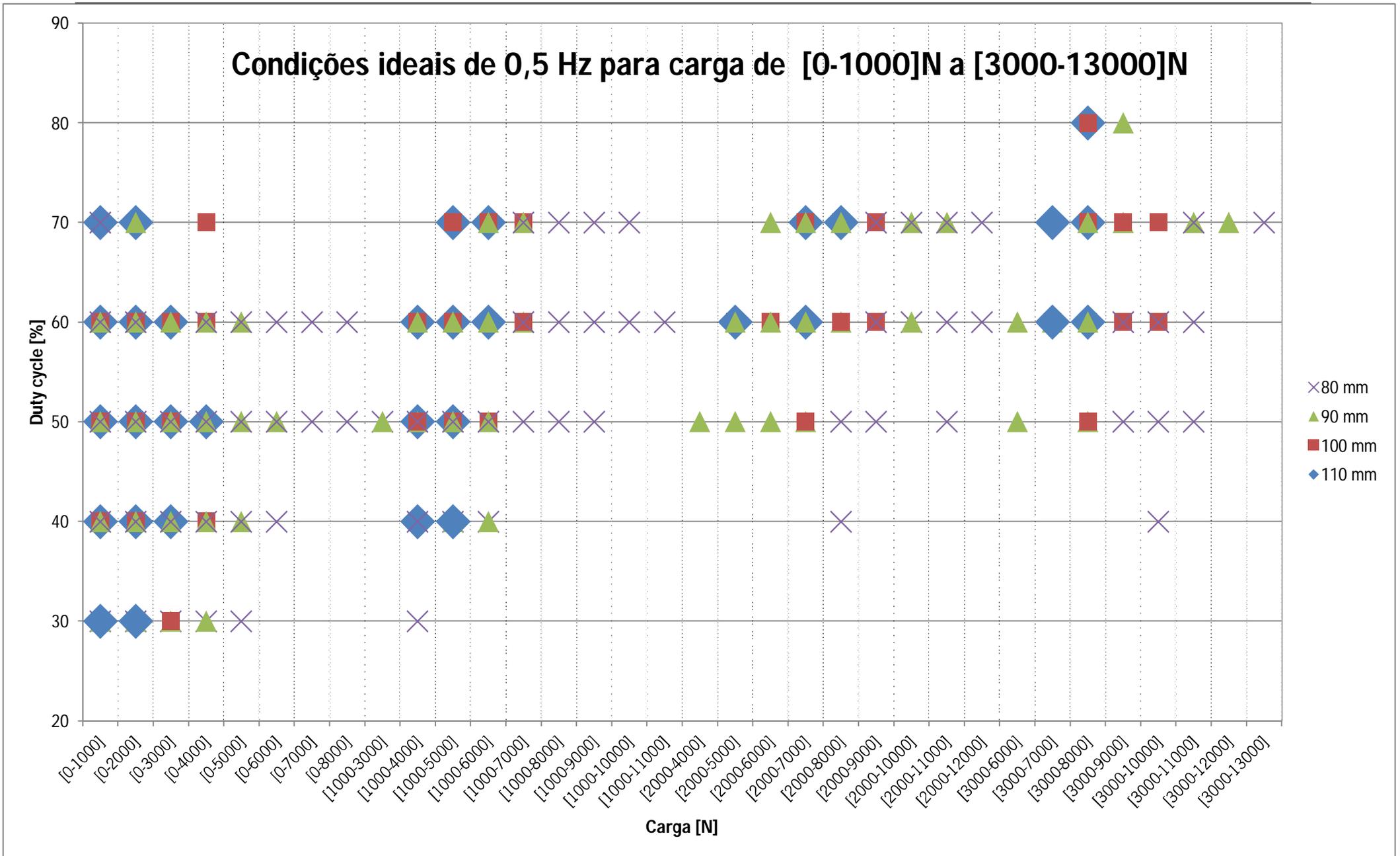


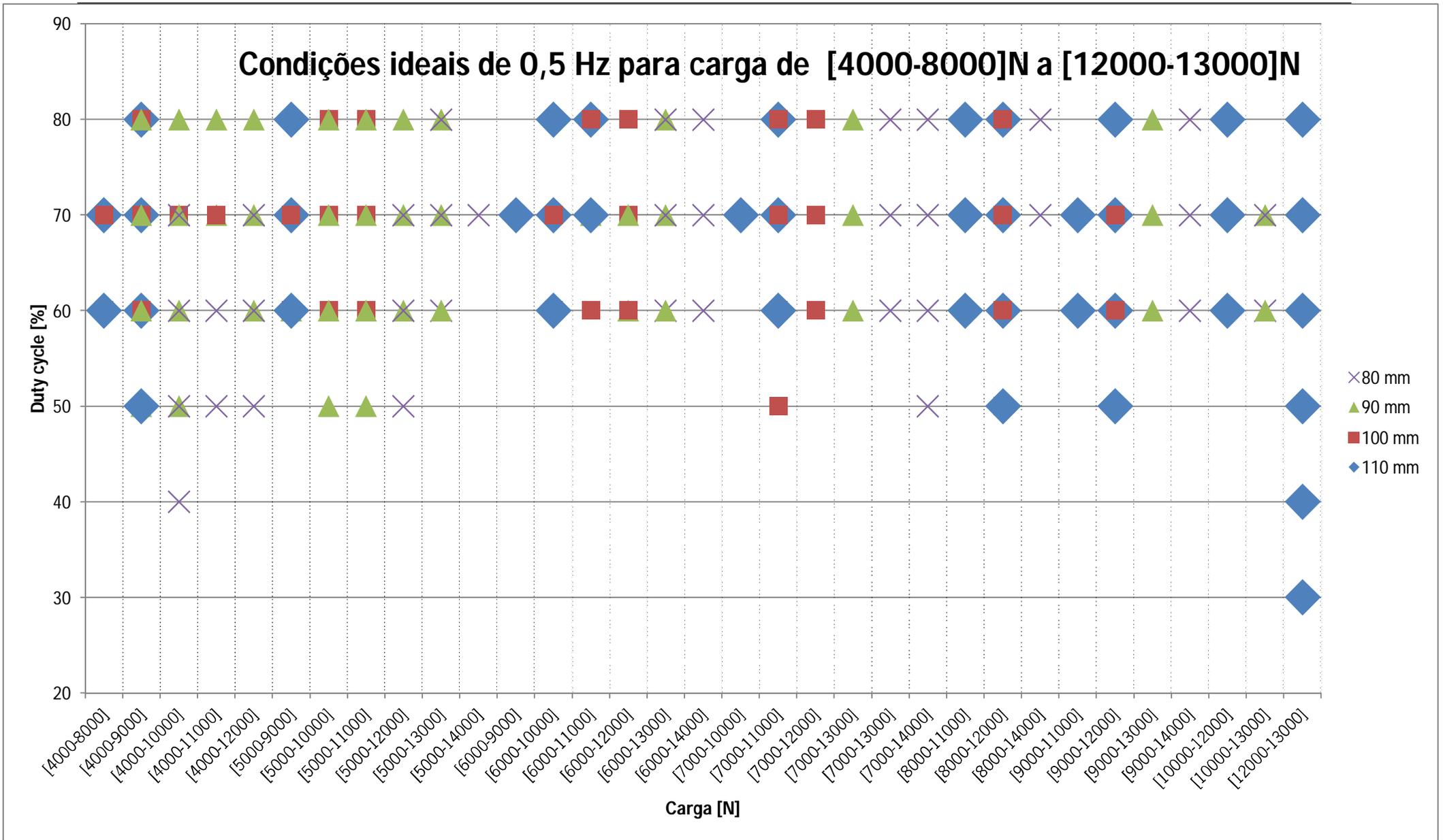
Anexo G - Condições ideais para frequência fixa

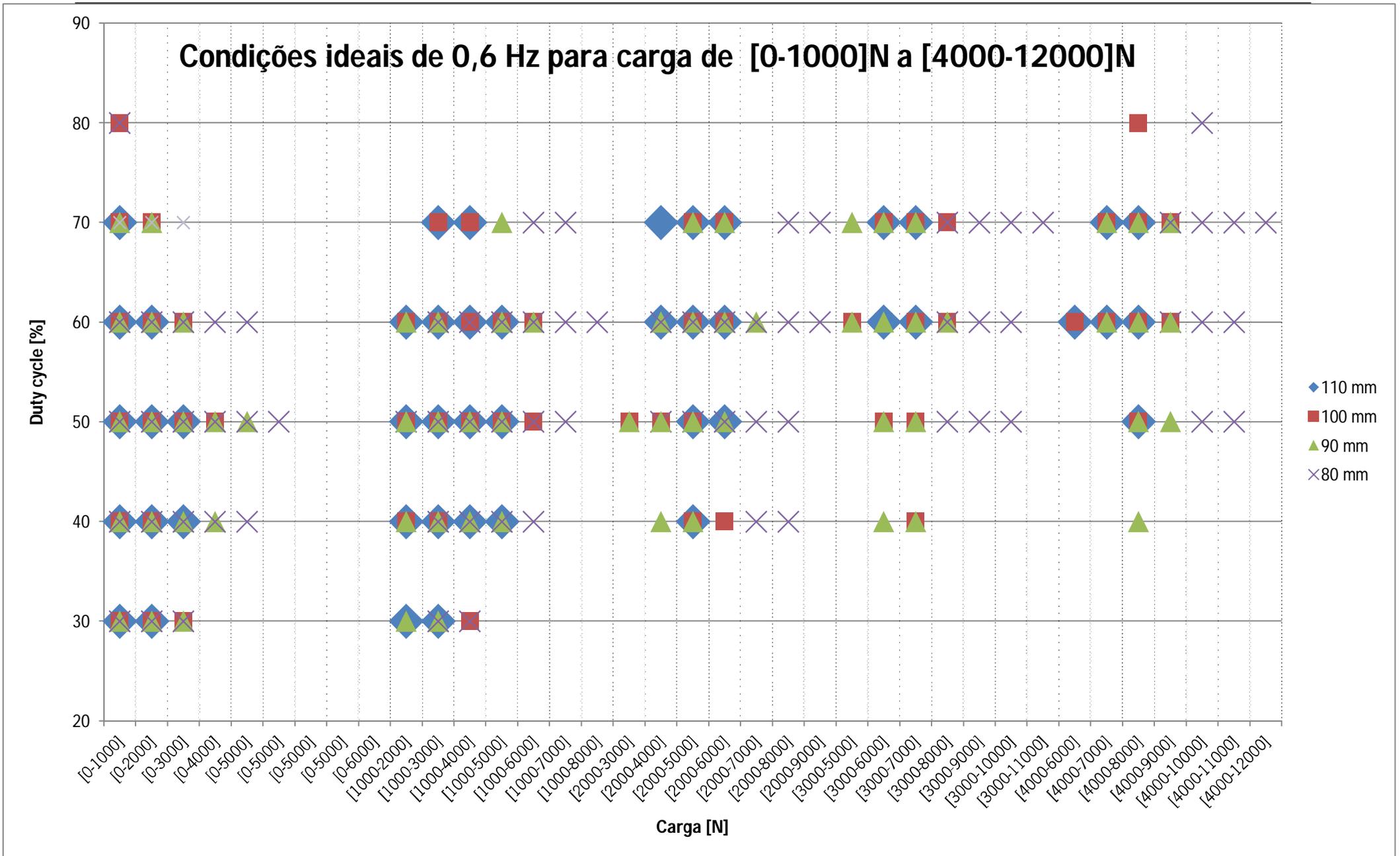


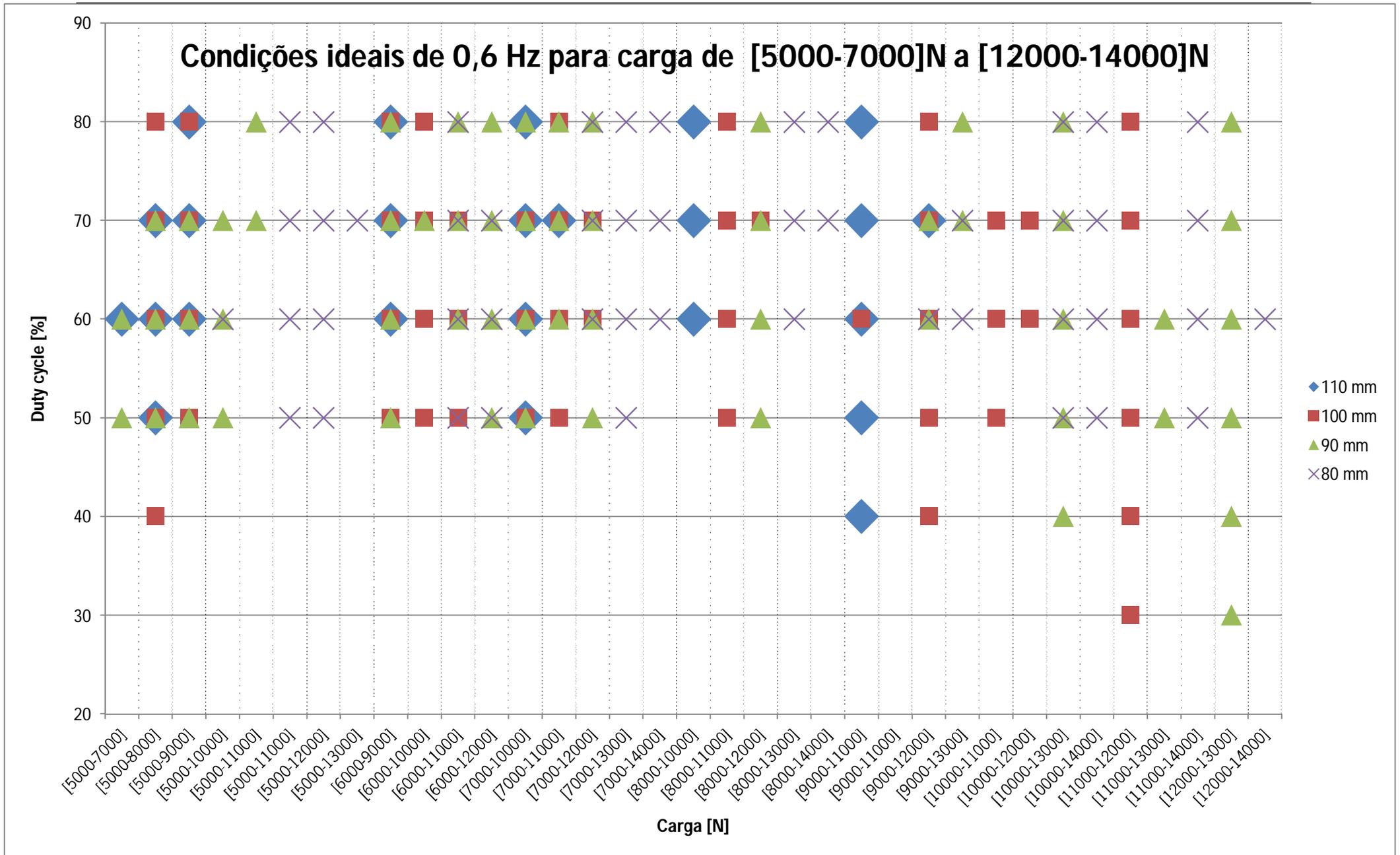


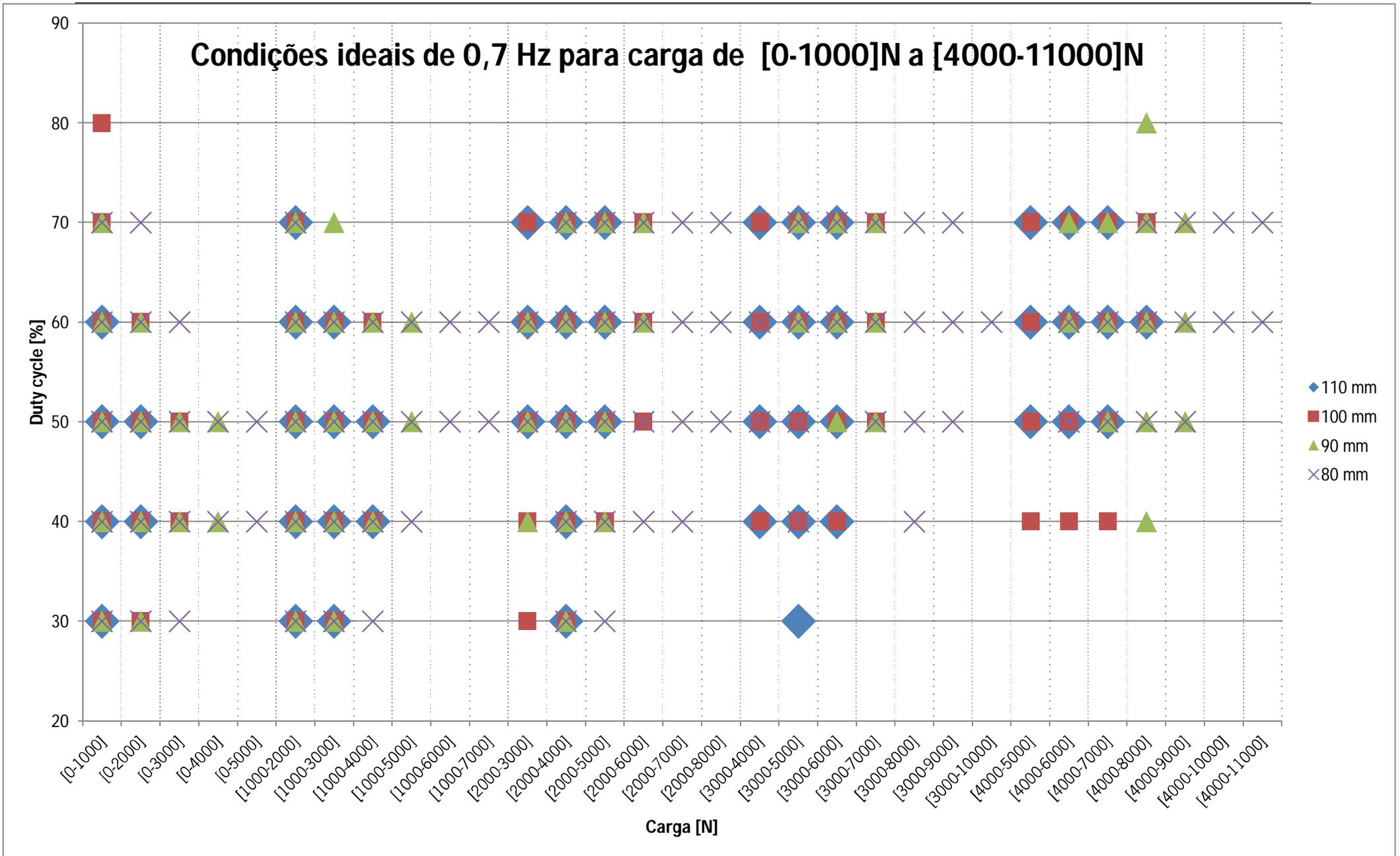


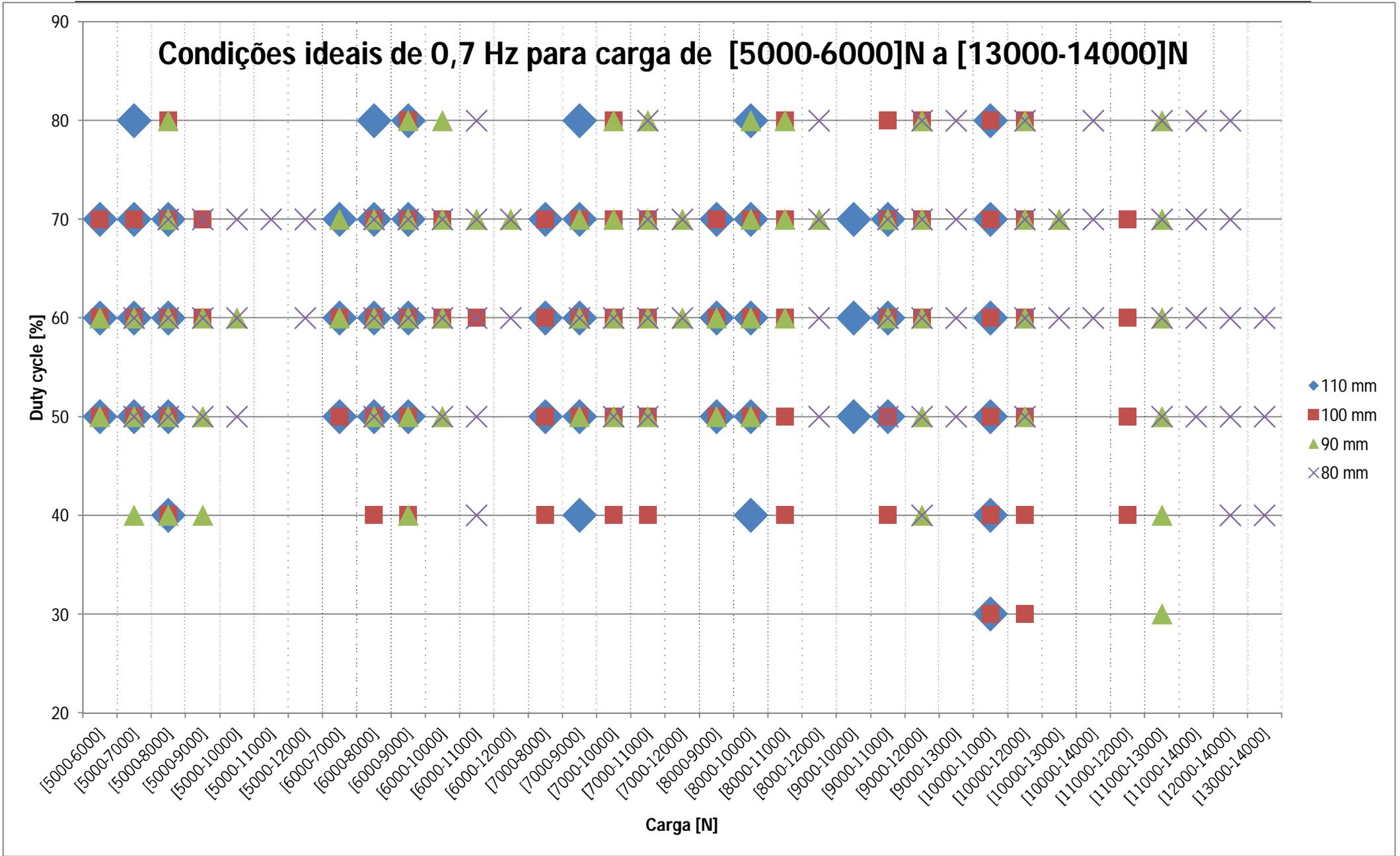


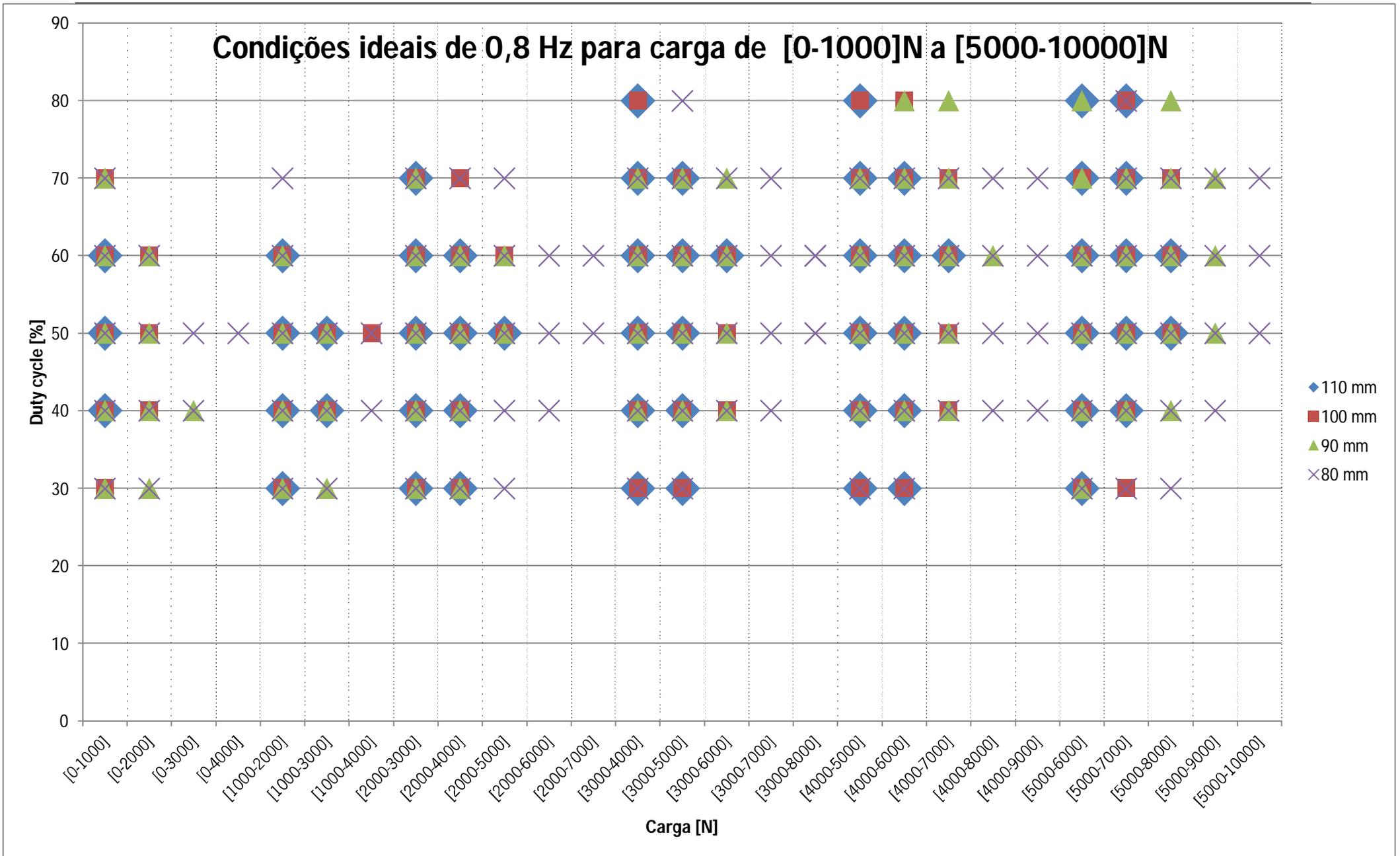


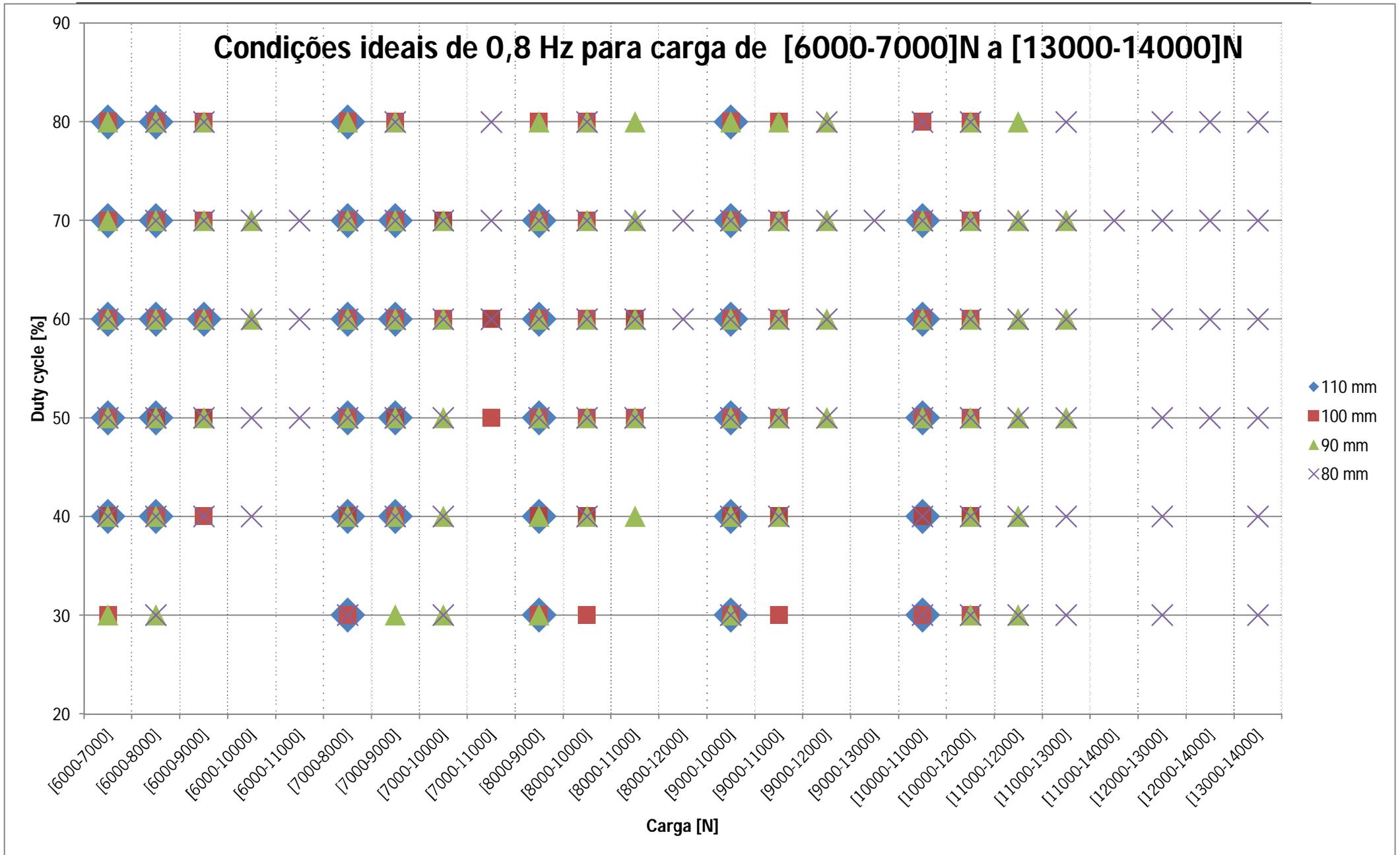


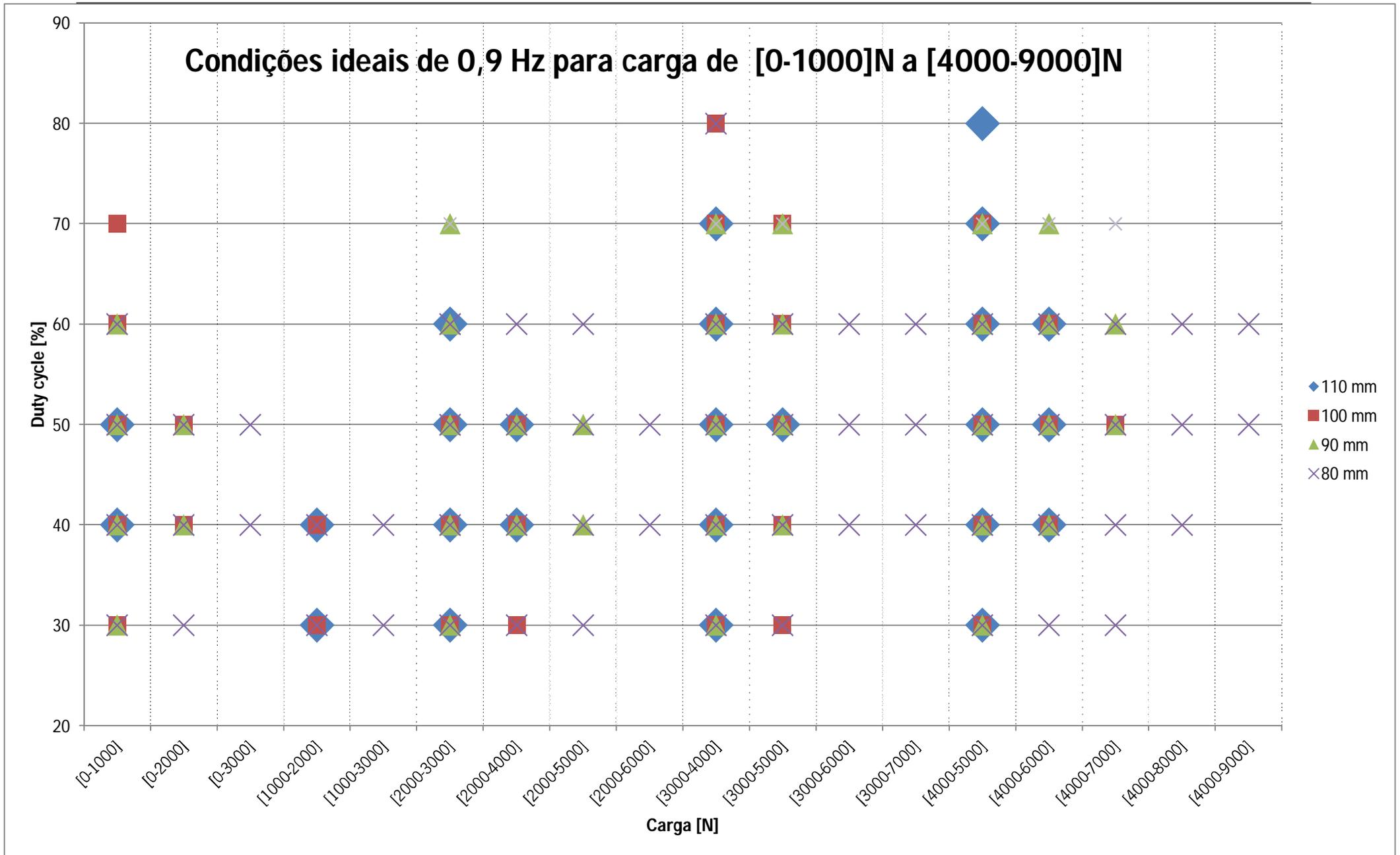




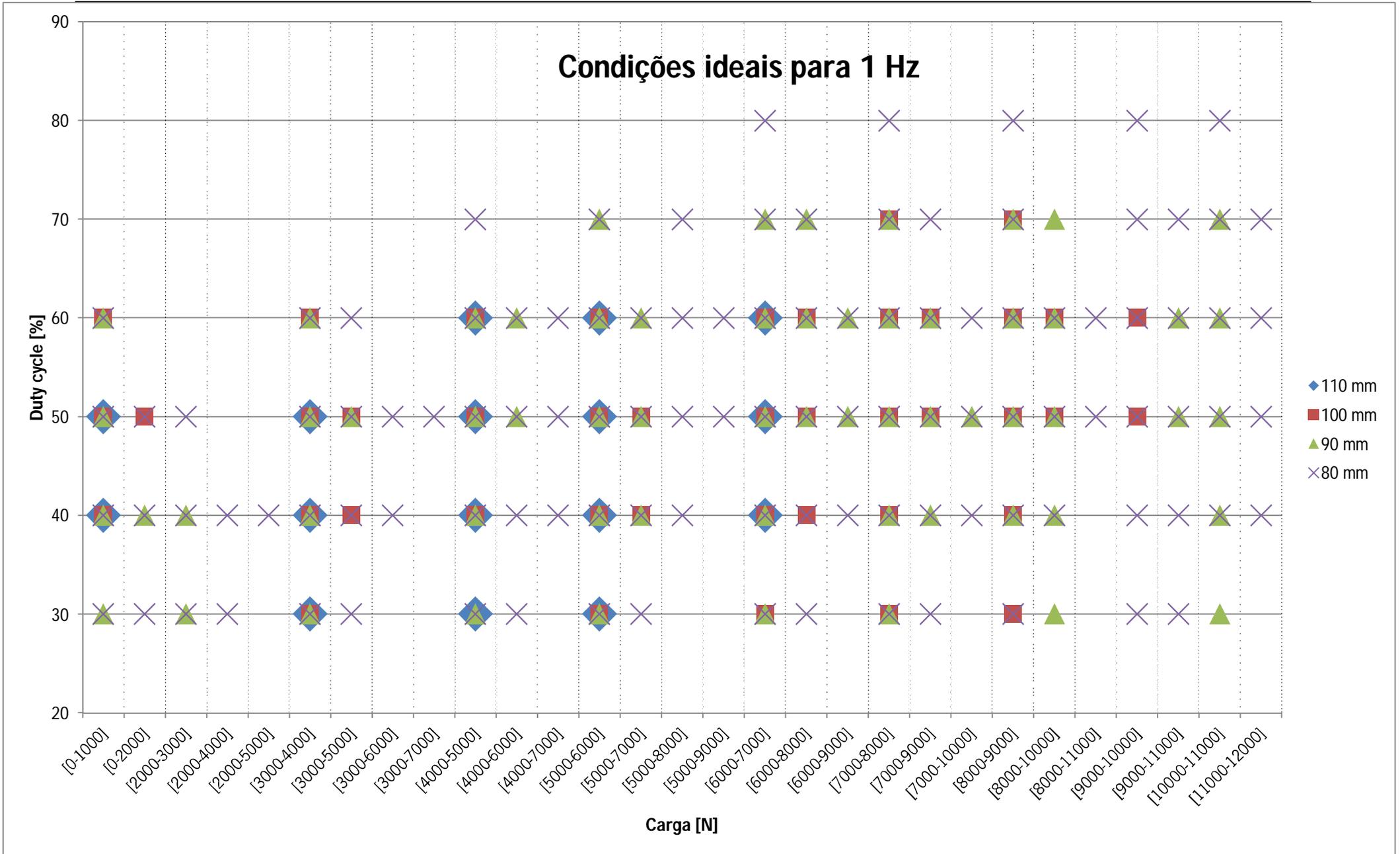




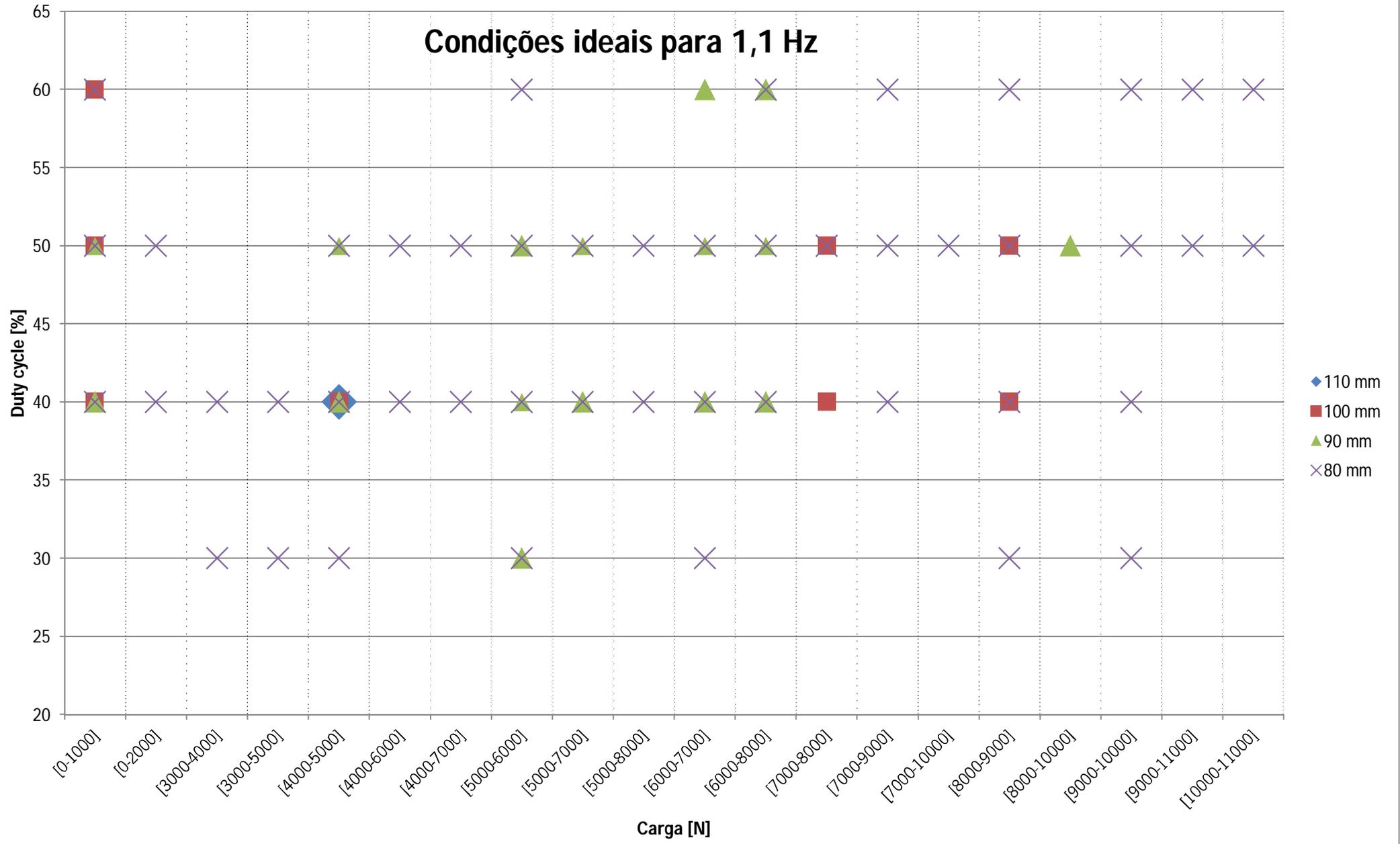








### Condições ideais para 1,1 Hz





## Anexo H – Manual de utilização

**Perante a dúvida de utilização devidamente do equipamento leia atentamente o manual de utilização.**

**Para o processo de inicialização de um ensaio seguir os seguintes passos:**

Passo 1- Ligar a fonte de alimentação e o PC;



Figura 1 – Fonte de alimentação ligada.

Passo 2- Ligar mangueira à saída do ar;



Figura 2 – Ligação da mangueira à saída de ar.

Passo 3- Abrir passador de ar comprimido;



Figura 3 – Passador de ar comprimido na posição *on*.

Passo 4- Iniciar programa desenvolvido;

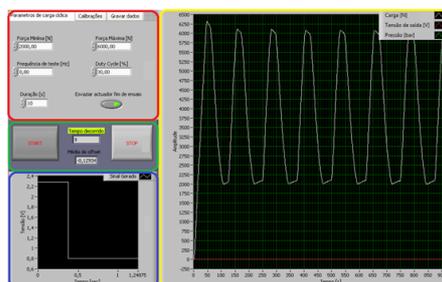


Figura 4- Inicialização de Software

Passo 5- Introduzir os parâmetros para a realização de ensaio.

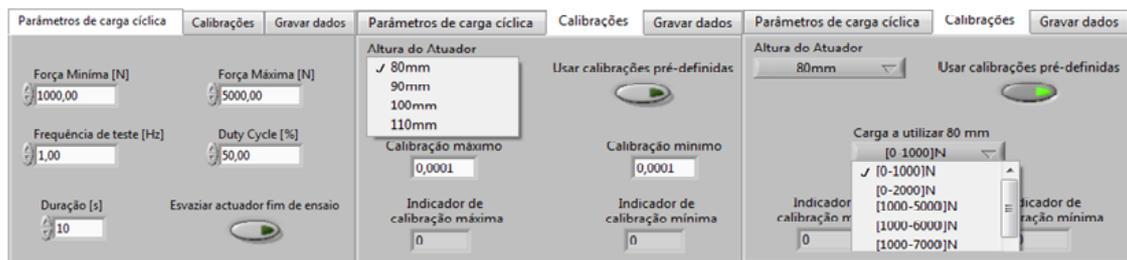


Figura 5- Escolha dos parâmetros do ensaio

Neste passo terão de ser definidos todas as variáveis do sistema, nomeadamente Carga máxima e mínima, duty cycle, frequência altura do atuador e tempo de duração do ensaio. É também necessário definir o tipo de calibrações a usar. Para calibrações manuais é aconselhável fazer os ajustes durante o decorrer do ensaio.

Passo 6- Inicialização do ensaio.



Figura 6- Inicialização de programa e de ensaio respetivamente

**Para sua segurança e dos equipamentos é recomendado no fim dos ensaios:**

Passo 7- Fechar passador de ar comprimido;



Figura 7 – Passador na posição *off*.

Passo 8- Retirar mangueira e desligar fonte de alimentação.



Figura 8 – Mangueira retirada e fonte de alimentação desligada.

## Anexo I – Calibração de valores

80 mm				80 mm			
Carga Mínima	Carga Máxima	Valor de conversão Mínimo	Valor de conversão Máximo	Carga Mínima	Carga Máxima	Valor de conversão Mínimo	Valor de conversão Máximo
0	1000	-	0,00026	3000	13000	0,0005	0,000375
0	2000	-	0,00032	3000	14000	0,00055	0,00041
0	3000	-	0,000325	4000	5000	0,000445	0,000415
0	4000	-	0,000305	4000	6000	0,00045	0,00041
0	5000	-	0,000295	4000	7000	0,000455	0,000398
0	6000	-	0,00029	4000	8000	0,00046	0,000385
0	7000	-	0,00029	4000	9000	0,00046	0,00038
0	8000	-	0,00029	4000	10000	0,00046	0,00038
0	9000	-	0,000305	4000	11000	0,00047	0,00037
0	10000	-	0,00032	4000	12000	0,00049	0,00037
0	11000	-	0,00035	4000	13000	0,000485	0,000395
0	12000	-	0,00035	4000	14000	0,000525	0,000425
0	13000	-	0,00037	5000	6000	0,000447	0,000425
1000	2000	0,00044	0,00038	5000	7000	0,000455	0,000415
1000	3000	0,00044	0,000365	5000	8000	0,00046	0,000405
1000	4000	0,00044	0,000345	5000	9000	0,00046	0,000392
1000	5000	0,00045	0,000325	5000	10000	0,000455	0,00038
1000	6000	0,00045	0,000315	5000	11000	0,00046	0,00038
1000	7000	0,00045	0,00031	5000	12000	0,000465	0,00038
1000	8000	0,00045	0,00031	5000	13000	0,000465	0,00038
1000	9000	0,00046	0,000325	5000	14000	0,000455	0,000425
1000	10000	0,00048	0,00033	6000	7000	0,00045	0,000427
1000	11000	0,00048	0,00033	6000	8000	0,00045	0,00042
1000	12000	0,0005	0,00036	6000	9000	0,000457	0,000408
1000	13000	0,00065	0,0004	6000	10000	0,000457	0,0004
1000	14000	0,00065	0,00039	6000	11000	0,000457	0,000395
2000	3000	0,00045	0,000403	6000	12000	0,00047	0,00038
2000	4000	0,00045	0,000395	6000	13000	0,00048	0,00041
2000	5000	0,00045	0,000377	6000	14000	0,000485	0,000415
2000	6000	0,00045	0,00036	7000	8000	0,00045	0,00043
2000	7000	0,00045	0,00035	7000	9000	0,000457	0,000422
2000	8000	0,00045	0,000345	7000	10000	0,00045	0,00041
2000	9000	0,00047	0,000345	7000	11000	0,00045	0,0004
2000	10000	0,00047	0,00035	7000	12000	0,00046	0,0004
2000	11000	0,00049	0,00035	7000	13000	0,00047	0,000416
2000	12000	0,0005	0,00036	7000	14000	0,000465	0,000398
2000	13000	0,00055	0,00039	8000	9000	0,000449	0,00043
2000	14000	0,00065	0,00042	8000	10000	0,000457	0,000425
3000	4000	0,000445	0,000415	8000	11000	0,00046	0,000415
3000	5000	0,00045	0,000405	8000	12000	0,00046	0,00041
3000	6000	0,00045	0,000385	8000	13000	0,000465	0,00041
3000	7000	0,00045	0,000372	8000	14000	0,000465	0,00041
3000	8000	0,00045	0,000363	9000	10000	0,000442	0,000425
3000	9000	0,00045	0,000355	9000	11000	0,000452	0,000427
3000	10000	0,000465	0,000353	9000	12000	0,000452	0,000427
3000	11000	0,000475	0,000365	9000	13000	0,000453	0,000414
3000	12000	0,00049	0,00039	9000	14000	0,000463	0,000428

80 mm			
Carga Mínima	Carga Máxima	Valor de conversão Mínimo	Valor de conversão Máximo
10000	11000	0,000445	0,000428
10000	12000	0,000447	0,000425
10000	13000	0,000455	0,000425
10000	14000	0,000455	0,000425
11000	12000	0,000455	0,000438

80 mm			
Carga Mínima	Carga Máxima	Valor de conversão Mínimo	Valor de conversão Máximo
11000	13000	0,000453	0,00043
11000	14000	0,00046	0,00043
12000	13000	0,00046	0,000438
12000	14000	0,00046	0,000438
13000	14000	0,000452	0,00044

90 mm			
Carga Mínima	Carga Máxima	Valor de conversão Mínimo	Valor de conversão Máximo
0	1000	-	0,0003
0	2000	-	0,00033
0	3000	-	0,000305
0	4000	-	0,0003
0	5000	-	0,00029
0	6000	-	0,00029
0	7000	-	0,0003
0	8000	-	0,000315
0	9000	-	0,00031
0	10000	-	0,00034
0	11000	-	0,00037
1000	2000	0,000511	0,00041
1000	3000	0,000511	0,00037
1000	4000	0,000511	0,000342
1000	5000	0,00052	0,00032
1000	6000	0,00054	0,00032
1000	7000	0,00056	0,000315
1000	8000	0,00053	0,000327
1000	9000	0,000511	0,000345
1000	10000	0,00053	0,00035
1000	11000	0,00053	0,000375
1000	12000	0,00053	0,00041
2000	3000	0,000483	0,00043
2000	4000	0,000496	0,000386
2000	5000	0,000496	0,000368
2000	6000	0,000499	0,000352
2000	7000	0,000499	0,000352
2000	8000	0,000529	0,000342
2000	9000	0,000527	0,000357
2000	10000	0,000525	0,00036
2000	11000	0,000525	0,00037
2000	12000	0,000525	0,0004
2000	13000	0,000525	0,00042
3000	4000	0,000478	0,000435
3000	5000	0,000478	0,0004
3000	6000	0,000482	0,000384

90 mm			
Carga Mínima	Carga Máxima	Valor de conversão Mínimo	Valor de conversão Máximo
3000	7000	0,000488	0,000374
3000	8000	0,000488	0,000374
3000	9000	0,000498	0,000362
3000	10000	0,00053	0,000382
3000	11000	0,00053	0,000395
3000	12000	0,00053	0,00039
3000	13000	0,00053	0,00041
4000	5000	0,000475	0,000437
4000	6000	0,00048	0,000412
4000	7000	0,00048	0,000402
4000	8000	0,00048	0,000394
4000	9000	0,000488	0,000394
4000	10000	0,00051	0,000394
4000	11000	0,00051	0,00041
4000	12000	0,000505	0,000395
4000	13000	0,000505	0,00042
5000	6000	0,000473	0,000447
5000	7000	0,000473	0,000428
5000	8000	0,000473	0,000415
5000	9000	0,000473	0,00041
5000	10000	0,00048	0,0004
5000	11000	0,00052	0,000425
5000	12000	0,00051	0,000415
5000	13000	0,000475	0,000408
6000	7000	0,000481	0,000452
6000	8000	0,000483	0,000438
6000	9000	0,000483	0,000428
6000	10000	0,000475	0,000412
6000	11000	0,000487	0,000412
6000	12000	0,00048	0,00041
6000	13000	0,000503	0,00042
7000	8000	0,00048	0,000452
7000	9000	0,000487	0,000445
7000	10000	0,000487	0,000435
7000	11000	0,00048	0,000426
7000	12000	0,000485	0,00042

90 mm			
Carga Mínima	Carga Máxima	Valor de conversão Mínimo	Valor de conversão Máximo
7000	13000	0,000495	0,000425
8000	9000	0,000474	0,000452
8000	10000	0,000483	0,000445
8000	11000	0,000483	0,000432
8000	12000	0,00049	0,000432
8000	13000	0,0005	0,00045
9000	10000	0,000468	0,000447
9000	11000	0,000473	0,000443

90 mm			
Carga Mínima	Carga Máxima	Valor de conversão Mínimo	Valor de conversão Máximo
9000	12000	0,000485	0,00044
9000	13000	0,00049	0,000445
10000	11000	0,000468	0,000453
10000	12000	0,000478	0,00045
10000	13000	0,00047	0,00045
11000	12000	0,00047	0,000455
11000	13000	0,00048	0,000452
12000	13000	0,000474	0,000458

100 mm			
Carga Mínima	Carga Máxima	Valor de conversão Mínimo	Valor de conversão Máximo
0	1000	-	0,0004
0	2000	-	0,00038
0	3000	-	0,00035
0	4000	-	0,00033
0	5000	-	0,00032
0	6000	-	0,00032
0	7000	-	0,00032
0	8000	-	0,00035
0	9000	-	0,00039
0	10000	-	0,00042
1000	2000	0,00055	0,000465
1000	3000	0,00056	0,00042
1000	4000	0,00056	0,00039
1000	5000	0,00057	0,000373
1000	6000	0,00059	0,000365
1000	7000	0,00059	0,000365
1000	8000	0,00059	0,00038
1000	9000	0,00059	0,00038
1000	10000	0,00066	0,00042
1000	11000	0,00066	0,00042
1000	12000	0,00066	0,00042
2000	3000	0,000523	0,00047
2000	4000	0,000523	0,000438
2000	5000	0,000523	0,00041
2000	6000	0,000545	0,000395
2000	7000	0,000552	0,000387
2000	8000	0,000552	0,000382
2000	9000	0,000595	0,000393
2000	10000	0,000595	0,000428
2000	11000	0,00062	0,000424
2000	12000	0,00068	0,00045
3000	4000	0,000515	0,00047
3000	5000	0,000521	0,000439

100 mm			
Carga Mínima	Carga Máxima	Valor de conversão Mínimo	Valor de conversão Máximo
3000	6000	0,000523	0,00042
3000	7000	0,000537	0,000405
3000	8000	0,000543	0,000405
3000	9000	0,000543	0,000405
3000	10000	0,000585	0,000405
3000	11000	0,00058	0,000432
3000	12000	0,00061	0,000438
4000	5000	0,000509	0,000473
4000	6000	0,000509	0,000444
4000	7000	0,00052	0,000424
4000	8000	0,000525	0,000412
4000	9000	0,000527	0,000413
4000	10000	0,00055	0,000425
4000	11000	0,00055	0,00042
4000	12000	0,00058	0,000455
5000	6000	0,00051	0,000478
5000	7000	0,00052	0,000458
5000	8000	0,00052	0,000442
5000	9000	0,00052	0,000424
5000	10000	0,00052	0,00043
5000	11000	0,00054	0,000428
5000	12000	0,00054	0,00046
6000	7000	0,000515	0,000489
6000	8000	0,00052	0,000475
6000	9000	0,00052	0,00046
6000	10000	0,00052	0,000455
6000	11000	0,000526	0,000456
6000	12000	0,00053	0,000448
7000	8000	0,000511	0,000487
7000	9000	0,000511	0,00047
7000	10000	0,000518	0,000466
7000	11000	0,000522	0,000465
7000	12000	0,00053	0,000454

100 mm			
Carga Mínima	Carga Máxima	Valor de conversão Mínimo	Valor de conversão Máximo
8000	9000	0,000503	0,000482
8000	10000	0,000507	0,00047
8000	11000	0,000515	0,00047
8000	12000	0,00052	0,00047
9000	10000	0,000511	0,000487

100 mm			
Carga Mínima	Carga Máxima	Valor de conversão Mínimo	Valor de conversão Máximo
9000	11000	0,00051	0,000478
9000	12000	0,00051	0,00047
10000	11000	0,000502	0,000486
10000	12000	0,00051	0,000478
11000	12000	0,000507	0,00049

110 mm			
Carga Mínima	Carga Máxima	Valor de conversão Mínimo	Valor de conversão Máximo
0	1000	-	0,00048
0	2000	-	0,00038
0	3000	-	0,00035
0	4000	-	0,000335
0	5000	-	0,000335
0	6000	-	0,00034
0	7000	-	0,00038
0	8000	-	0,000405
1000	2000	0,00064	0,000525
1000	3000	0,00064	0,000464
1000	4000	0,00065	0,000428
1000	5000	0,00065	0,000408
1000	6000	0,00065	0,000395
1000	7000	0,00065	0,0004
1000	8000	0,00068	0,00042
1000	9000	0,00075	0,000465
1000	10000	0,00085	0,000468
1000	11000	0,00085	0,0005
2000	3000	0,000588	0,000514
2000	4000	0,000588	0,00047
2000	5000	0,000588	0,00044
2000	6000	0,00062	0,000425
2000	7000	0,00062	0,00042
2000	8000	0,00064	0,00042
2000	9000	0,00066	0,00044
2000	10000	0,00073	0,00051
2000	11000	0,00078	0,00052
3000	4000	0,00057	0,000515
3000	5000	0,00057	0,00048
3000	6000	0,00057	0,00045
3000	7000	0,00057	0,000435
3000	8000	0,0006	0,000435
3000	9000	0,0006	0,00045
3000	10000	0,00065	0,00048
3000	11000	0,00067	0,00047
4000	5000	0,00057	0,000524

110 mm			
Carga Mínima	Carga Máxima	Valor de conversão Mínimo	Valor de conversão Máximo
4000	6000	0,00057	0,000487
4000	7000	0,00057	0,00046
4000	8000	0,00059	0,00047
4000	9000	0,00059	0,00046
4000	10000	0,0006	0,00046
4000	11000	0,00063	0,0005
5000	6000	0,000558	0,000515
5000	7000	0,000558	0,00049
5000	8000	0,00057	0,00048
5000	9000	0,00057	0,000465
5000	10000	0,00059	0,00048
5000	11000	0,00062	0,000516
6000	7000	0,000564	0,000528
6000	8000	0,00057	0,000505
6000	9000	0,000578	0,000492
6000	10000	0,00058	0,000485
6000	11000	0,00058	0,000485
7000	8000	0,00056	0,000523
7000	9000	0,000565	0,000508
7000	10000	0,00057	0,000508
7000	11000	0,00058	0,00049
8000	9000	0,00055	0,000523
8000	10000	0,000565	0,00051
8000	11000	0,000575	0,00051
9000	10000	0,000554	0,000528
9000	11000	0,00056	0,00052
10000	11000	0,000552	5,32E-05

## Anexo J – Desenhos técnicos

