

Apoio à Decisão na Seleção de Equipamentos de Escavação

Francisco Eduardo Contente Calhau

Dissertação para obtenção do Grau de Mestre em

Mestrado Integrado em Engenharia Civil

Júri

Presidente: Prof.^o Dr.^o Albano Luís Rebelo da Silva das Neves e Sousa

Orientador: Prof.^o Dr.^o Fernando António Baptista Branco

Vogal: Prof.^o Dr.^o Pedro Miguel Dias Vaz Paulo

Abril de 2013

Agradecimentos

Este espaço é dedicado a todos aqueles que deram o seu contributo para que esta dissertação fosse realizada. A todos, deixo os mais sinceros agradecimentos.

Ao meu orientador, Sr.^o Professor Doutor Fernando Branco, que desde o início acreditou nas potencialidades do tema que lhe propus. Fico-lhe grato pela forma como me motivou, pela liberdade de ação que permitiu, e mais importante de tudo, pela sua orientação e transmissão de conhecimentos.

Ao meu amigo Pedro Faísco, pelas muitas horas de programação, essenciais para finalizar este trabalho.

Ao Sr.^o Dr.^o José Calhau Branco, da MOBILIFT Portugal, pelos contactos que facilitou.

Ao Sr.^o Eng.^o Diogo Coelho Melo, Gestor de Produto da STET, pela forma como me recebeu e pelas indicações que foram o ponto de partida desta dissertação. Ao Sr.^o Francisco Venâncio pela importante informação disponibilizada e à Sr.^a D.^a Joaquina pela sua disponibilidade e amabilidade.

Ao Sr.^o Eng.^o Rui Faustino, Gestor de Produto na MOVITER; pela receção; pela análise ao trabalho já desenvolvido; pelos dados facultados; e pela opinião, fundamental para concluir esta dissertação.

Ao Sr.^o Ernesto Pinto e ao Sr.^o Eng.^o Luís Sousa, da CIMERTEX, e ao Sr.^o Luís Silva, da VOLVO ASC Máquinas, pelos seus esclarecimentos.

Ao Sr.^o Nuno Peixoto e ao Sr.^o Fernando Tomás, da 2AB, e ao Sr.^o João Felgar da ENTREPOSTO MÁQUINAS, pela sua pronta ajuda.

Resumo

O motivo da dissertação “*Apoio à Decisão na Seleção de Equipamentos de Escavação*” surgiu da necessidade de associar os custos unitários de uma operação de escavação aos equipamentos envolvidos na mesma.

Este trabalho apresenta um método simples e direto para o cálculo de custos horários, de escavadoras giratórias, com recurso à regressão exponencial univariável (UVER) e à regressão linear multivariável (MLVR), assim como, o *software EXCselector*, concebido para o cálculo de produtividade e custos horários/unitários de escavação, que reúne informações relativas às condições operacionais, aos volumes envolvidos, aos métodos UVER e MLVR, e às bases de dados de equipamentos, materiais e custos.

Para tal, definem-se critérios normalizados para a caracterização e seleção de equipamentos de escavação (escavadoras giratórias); faz-se a análise dos materiais de escavação; definem-se parâmetros de produção; aplica-se um modelo determinístico para os cálculos de produção e custos; e faz-se o levantamento de equipamentos existentes no mercado, reunindo as suas características, preços e serviços prestados pelos representantes das marcas.

Como conclusão, pretende-se com esta dissertação fornecer uma ferramenta útil para o apoio à decisão na seleção de equipamentos de escavação, cálculo de custos e produtividade, capaz de suprir a necessidade de uma consulta de mercado.

PALAVRAS CHAVE: Escavação, Escavadoras, Custos, Produtividade, Condições operacionais.

Abstract

The reason for writing the dissertation "A Decision Support System for Excavation Equipment Selection" arose from the need to associate the unit cost for an excavation operation with the equipment involved in it.

This paper presents a simple and straightforward method for calculating hourly rates for hydraulic excavators, using Uni-Variable Exponential Regression (UVER) and Multi-Variable Linear Regression (MVLRL), as well as the software *EXCselector* designed to calculate hourly/unit costs and productivity for excavation operations, which gathers information on the operating conditions, the volume involved, the UVER and MLVR methods, and the equipment, materials and costs database.

The objectives of this study are to define standardized criteria for the characterization and selection of excavation equipment (hydraulic excavators); to analyze excavation materials; to define output parameters; to apply a deterministic model for calculation of production and costs; and to collect information about equipment's provided by brands representatives, combining their features, prices and services.

Therefore, this research provides a useful tool for decision making support for the selection of excavation equipment, costs and productivity calculation, which will be capable of meeting the market needs.

KEYWORDS: Excavation, Excavators, Costs, Productivity, Operating conditions.

Índice Geral

Agradecimentos.....	I
Resumo	II
Abstract.....	III
Índice Geral	IV
Índice de Figuras	VII
Índice de Quadros	VIII
Símbolos e Abreviaturas	IX
1. INTRODUÇÃO	1
1.1. Enquadramento do Tema	1
1.2. Âmbito, Motivação e Objetivos.....	1
1.3. Organização do Trabalho.....	2
2. EQUIPAMENTOS DE ESCAVAÇÃO.....	3
2.1. Definição de Equipamentos de Movimentação de Terras	3
2.2. Escavadoras: Caracterização	4
2.2.1. Introdução	4
2.2.2. Escavadoras de Rastos	4
2.2.3. Escavadoras de Rodas	5
2.2.4. Escavadoras Frontais	5
2.2.5. Escavadoras, Retroescavadoras	6
2.2.5.1. Ferramenta de Escavação	7
2.2.5.2. Baldes	7
2.2.5.3. Acessórios.....	9
2.2.6. Miniescavadoras	9
2.2.7. Escavadoras de Raio Compacto.....	9
2.3. Escavadoras: Especificações Comerciais	10
2.3.1. Introdução	10
2.3.2. Peso Operacional.....	10
2.3.3. Motor	10
2.3.4. Capacidade do Balde.....	11
2.3.5. Dimensões de Transporte.....	11

2.3.6.	Dimensões de Alcance	12
2.3.7.	Capacidade de Levantamento	13
2.3.8.	Forças da Ferramenta de Escavação	14
3.	CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE MATERIAIS DE ESCAVAÇÃO	15
3.1.	Introdução e Importância Económica	15
3.2.	Génese e Constituição	15
3.3.	Solos	15
3.3.1.	Dimensão das Partículas	15
3.3.2.	Relação Entre Fases.....	17
3.3.3.	Limites de Consistência	17
3.3.4.	Classificação de Solos	18
3.4.	Rochas	19
3.5.	Sísmica de Refração.....	20
3.6.	Empolamento	20
3.7.	Regras de Medição	20
4.	PARÂMETROS DE PRODUÇÃO	23
4.1.	Introdução	23
4.2.	Ciclos de Produção	23
4.2.1.	Condições Operacionais	24
4.2.2.	Estimativa de Tempo de Ciclo	25
4.3.	Eficiência	27
4.3.1.	Eficiência Global (E_G).....	27
4.3.2.	Eficiência Horária (E_H).....	28
4.3.3.	Eficiência Mecânica (E_M).....	28
4.3.4.	Eficiência do Operador (E_O).....	29
4.4.	Capacidade Útil do Balde (Q_U).....	29
5.	CUSTOS	31
5.1.	Introdução	31
5.2.	Custo de Propriedade (C_{PRP})	31
5.2.1.	Depreciação e Amortização	32
5.2.2.	Encargos Indiretos	33

5.3.	Custo de Operação (C_{OP}).....	34
5.3.1.	Combustível	34
5.3.2.	Lubrificantes	35
5.3.3.	Manutenção e Reparação (MR).....	36
5.4.	Custo do Manobrador (C_{Man}).....	37
5.5.	Estimativas de Custos.....	37
5.5.1.	UVER	38
5.5.2.	MVLR	39
5.5.3.	Análise de Resultados	40
5.5.4.	Exemplo	41
6.	CRITÉRIOS DE SELEÇÃO.....	43
6.1.	Introdução	43
6.2.	Seleção de Equipamentos	43
6.2.1.	Seleção da Máquina	43
6.2.2.	Seleção da Ferramenta de Escavação	43
6.2.3.	Seleção do Balde	44
6.3.	Seleção de Equipas	45
7.	<i>SOFTWARE EXCselector</i>	49
7.1.	Introdução e Conceção	49
7.2.	Instruções.....	50
7.3.	Exemplo	53
8.	CONCLUSÃO.....	55
	Bibliografia.....	57
	Anexo 1	61
	Anexo 2	63
	Anexo 3	67
	Anexo 4	69

Índice de Figuras

Figura 1: Rastos metálicos (Esq.) e rastros de borracha (Dir.). ⁽⁶⁾	5
Figura 2: Escavadora de rodas. ⁽⁷⁾	5
Figura 3: Escavadora frontal. ⁽⁸⁾	6
Figura 4: Movimento do dispositivo de ataque. ⁽⁹⁾	7
Figura 5: Escavadora com lança inteira (Esq.) e bipartida (Dir.). ⁽⁹⁾	7
Figura 6: Balde "standard" (Esq.); Balde para escavação em rocha (Dir.). ⁽¹⁰⁾	8
Figura 7: Balde de regularização (Esq.); Balde perfurado (Dir.). ⁽¹¹⁾	8
Figura 8: Balde trapezoidal (Esq.); Balde de maxilas (Dir.). ⁽¹¹⁾	8
Figura 9: Riper (Esq.); Martelo Hidráulico (Dir.). ⁽¹²⁾	9
Figura 10: MSRX; Vista lateral (Esq.); Vista superior (Dir.). ⁽⁶⁾	9
Figura 11: Capacidade do Balde. ⁽¹⁷⁾	11
Figura 12: Dimensões de transporte. ⁽¹⁰⁾	12
Figura 13: Dimensões de alcance. ⁽¹⁰⁾	12
Figura 14: Máquina hipotética, variação da capacidade de levantamento. ⁽¹⁷⁾	13
Figura 15: Força de ataque (Esq.) e força de arranque (Dir.); F – força da ferramenta; 1 – pivô de rotação; A e B – raios de rotação. ⁽²¹⁾	14
Figura 16: Exemplo de curva granulométrica. ⁽²⁶⁾	16
Figura 17: Diferentes modos de execução da escavação para implantação de uma sapata. ⁽³⁰⁾	21
Figura 18: Peso operacional Vs Tempo de ciclo.	26
Figura 19: Gráfico dos consumos, kW Vs l/h.	35
Figura 20: Efeitos da falha no custo de reparação (Esq.); Ponto ótimo para MR (Dir.). ⁽¹⁷⁾	36
Figura 21: Peso operacional Vs Custos horários.	38
Figura 22: W3 – Peso do balde; W4 – Peso do material escavado; L – Alcance máximo com o balde carregado. ⁽¹¹⁾	44
Figura 23: Raio do balde. ⁽¹⁷⁾	45
Figura 24: Sistemas de acoplamento, Universal (Esq.) e Dedicado (Dir.). ⁽³⁵⁾	45
Figura 25: Camião basculante e escavadora (Esq.); Dumper (Dir.). ⁽³⁶⁾	46
Figura 26: Fluxograma do <i>EXCselector</i> .	49
Figura 27: Janela do <i>EXCselector</i> .	50
Figura 28: 1º Passo, <i>EXCselector</i> .	51
Figura 29: 2º Passo, sequência da seleção de um solo no <i>EXCselector</i> .	52
Figura 30: 3º Passo, <i>EXCselector</i> .	52

Índice de Quadros

Quadro 1: Capacidade de levantamento (máquina hipotética). ⁽²⁰⁾	13
Quadro 2: Gamas de dimensões. ⁽²⁶⁾	16
Quadro 3: Consistência de um solo. ⁽²³⁾	18
Quadro 4: Símbolos para descrição de solos. ⁽²³⁾	18
Quadro 5: Trabalhabilidade (+++ Excelente; ++ Boa; + Razoável; - Má). ⁽²⁶⁾	19
Quadro 6: Classificação ISRM. ⁽²⁸⁾	19
Quadro 7: Classes de terreno. ⁽³⁰⁾	22
Quadro 8: Classificação das condições operacionais. ^{(2) (10) (17)}	24
Quadro 9: Limites para t_{Ciclo} . ⁽¹⁷⁾	25
Quadro 10: Dados da amostra “tempo de ciclo”	26
Quadro 11: Fator de correção do t_{Ciclo}	27
Quadro 12: Eficiência global. ⁽¹¹⁾	28
Quadro 13: Fator de enchimento. ⁽¹⁸⁾	29
Quadro 14: Dados da amostra “consumos”	35
Quadro 15: Dados da amostra “custos”	37
Quadro 16: Correlações da amostra “custos”	38
Quadro 17: Coeficientes de determinação MVLR.	39
Quadro 18: Sumário da MVLR para C_{PRP}	39
Quadro 19: Sumário da MVLR para C_{OP}	39
Quadro 20: Valores de MAER para o C_{PRP} e C_{OP} para os métodos UVER e MVLR.....	40
Quadro 21: Máquinas da amostra, da classe de vinte e duas toneladas.	41
Quadro 22: Custo de máquina hipotética (MVLR), média de custos de máquinas da classe e MAER relativo ao exemplo.	41
Quadro 23: Características e custo horário dos equipamentos.....	53
Quadro 24: Características das tarefas de escavação.	53
Quadro 25: Resultados obtidos pelo <i>EXCselector</i>	54

Símbolos e Abreviaturas

Símbolos:

C_{actual}	(€/h)	Custo horário atual
C_{Comb}	(€/h)	Custo horário com combustível
$C_{\text{PRP}}^{\text{d}}$	(€/h)	Custo horário de propriedade, direto
C_{estimado}	(€/h)	Custo horário estimado
C_{HT}	(€/h)	Custo horário total
$C_{\text{PRP}}^{\text{i}}$	(€/h)	Custo horário de propriedade, indireto
C_{Man}	(€/h)	Custo horário do manobrador
C_{MR}	(€/h)	Custo horário com manutenção e reparação
C_{OP}	(€/h)	Custo horário de operação
C_{PRP}	(€/h)	Custo horário de propriedade
e		Índice de vazios
E	(Pa)	Módulo de elasticidade
E_{G}		Eficiência global
E_{H}		Eficiência horária
E_{M}		Eficiência mecânica
E_{O}		Eficiência do operador
F_{EB}		Fator de enchimento do balde
I_{m}	(€/ano)	Investimento médio anual
I_{P}		Índice de plasticidade
n	(unidades)	Número de ciclos para o carregamento de um caminhão
N	(unidades)	Número de caminhões
N_{anos}	(anos)	Número de anos de amortização
P_{E}	(m ³ /h)	Produtividade de escavação
q	(m ³)	Capacidade do caminhão
Q_{N}	(m ³)	Capacidade nominal do balde
Q_{u}	(m ³)	Capacidade útil do balde
R^2		Coefficiente de determinação
t_{C}	(s)	Tempo de carregamento
T_{C}	(s)	Tempo de carregamento de um caminhão
t_{Ciclo}	(s)	Tempo de ciclo
t_{D}	(s)	Tempo de descarga
t_{RC}	(s)	Tempo de rotação com balde carregado
t_{RD}	(s)	Tempo de rotação com balde descarregado
T_{V}	(s)	Tempo de viagem de um caminhão
V_{nat}	(m ³)	Volume natural
v_{P}	(m/s)	Velocidade das ondas P
$V_{\text{Sólidos}}$	(m ³)	Volume de sólidos
v_{S}	(m/s)	Velocidade das ondas S
V_{solto}	(m ³)	Volume solto
V_{V}	(m ³)	Volume de vazios
V_{W}	(m ³)	Volume de água
γ_{n}	(N/m ³)	Peso específico, estado natural
γ_{s}	(N/m ³)	Peso específico, estado solto
σ_{C}	(Pa)	Resistência à compressão simples

Unidades:

€/h	Euro por hora
€/l	Euros por litro
cm ³	Centímetro cúbico
cv	Cavalo-vapor
h	Hora
h/ano	Horas por ano
hp	Horse-power
kg	Quilograma
kg/cm ²	Quilograma por centímetro quadrado
kW	Quilowatt
l/h	Litros por hora
l/kW.h	Litros por quilowatt hora
m/s	Metros por segundo
m ³	Metro cúbico
m ³ /h	Metro cúbico por hora
N/m ³	Newton por metro cúbico
Pa	Pascal
ton	Toneladas
s	Segundo

Abreviaturas:

AG	Algoritmo genético
CESMM	<i>Civil Engineering Standard Method of Measurement</i>
DL	Decreto-lei
DR	Decreto regulamentar
GPS	Sistema de posicionamento global
ISO	<i>International Organization for Standardization</i>
ISRM	<i>International Society Rock Mechanics</i>
LL	Limite de liquidez
LNEC	Laboratório Nacional de Engenharia Civil
LP	Limite de plasticidade
MAER	Taxa média de erro absoluta
MR	Manutenção e reparação
MVLR	<i>Multi-Variable Linear Regression</i> – Regressão linear multivariável
NBN	Norma Belga
NP	Norma portuguesa
PTI	Preço de Transferência Interna
R ²	Coefficiente de determinação
RCD	Resíduos da Construção e Demolição
SAE	<i>Society of Automotive Engineers</i>
SIG	Sistema de informação geográfica
SMM	<i>Standard Method of Measurement</i>
™	Trade Mark
USCS	<i>Unified Soil Classification System</i> – Classificação unificada de solos
UVER	<i>Uni-Variable Exponential Regression</i> – Regressão exponencial univariável

1. INTRODUÇÃO

1.1. Enquadramento do Tema

No passado surgiu, no setor da construção e obras públicas, o desafio da mecanização. Numa primeira fase este desafio debateu-se com os grandes projetos e a sua grande incidência de mão de obra. Este impulso possibilitou a realização de grandes obras, sem paralelo até à data. Permitiu separar continentes e ligar oceanos, com a abertura do canal do Suez e canal do Panamá; construir grandes barragens de aterro e estradas; alterar a orografia com uma facilidade extraordinária.

Hoje os desafios são outros. As questões ambientais estão na ordem do dia. Existe uma maior compreensão para a importância da redução de desperdícios e aproveitamento dos resíduos da construção e demolição (RCD). No que toca aos equipamentos de escavação é imperativa a redução dos consumos de combustíveis, tanto do ponto de vista ambiental como económico.

Surgem novos desafios técnicos: escavação em meio urbano, com grande aproveitamento do espaço; necessidade de saúde, higiene e segurança no trabalho; mão de obra mais especializada e prazos mais apertados; o que exige um melhor planeamento, uma gestão integrada ao longo do Projeto e uma melhor previsão e controlo de custos.

Abre-se também espaço às novas tecnologias, modelos computacionais para a simulação de cenários de execução de obras, integração de sistemas GPS, controlo remoto em tempo real, tudo com o objetivo de atingir uma maior eficiência no trabalho e garantir a melhor produtividade dos equipamentos, para o menor prazo e menor custo.

1.2. Âmbito, Motivação e Objetivos

A dissertação desenvolvida insere-se no curriculum do Mestrado Integrado em Engenharia Civil, pós Bolonha, ramo de construção, lecionado no Instituto Superior Técnico.

O motivo da dissertação "*Apoio à Decisão na Seleção de Equipamentos de Escavação*" surgiu no seguimento de alguns temas abordados durante o curso, como: planeamento, economia, organização e gestão na construção e da dificuldade de associar os custos unitários de uma operação de escavação aos equipamentos envolvidos na mesma.

Com o desenvolvimento deste trabalho pretende-se fornecer uma ferramenta útil, para a gestão de um parque de máquinas existente (escavadoras giratórias), permitindo a otimização da seleção destes equipamentos através de critérios de produtividade, custos e especificações técnicas. Para tal este trabalho tem como objetivos:

- definir critérios normalizados para a caracterização e seleção de equipamentos de escavação (escavadoras giratórias);
- aplicar um modelo determinístico para os cálculos de produção e custos;
- fazer um levantamento de equipamentos existentes no mercado, reunindo as suas características, preços e serviços prestados pelos representantes das marcas;
- apresentar um método simples e direto para o cálculo de custos horários;
- por fim, concentrar os dados de produção, materiais e custos num *software* concebido para o cálculo de custos horários/unitários de escavação.

1.3. Organização do Trabalho

Capítulo 1: *Introdução*, corresponde ao presente capítulo, onde se pretende enquadrar o tema da escavação mecanizada, no setor da construção e obras públicas, sua importância histórica, económica e ambiental, assim como apresentar o âmbito, motivação e objetivos, a que a dissertação se propõe, e exibir a sua organização.

Capítulo 2: *Equipamentos de Escavação*, pretende-se classificar e agrupar as máquinas de movimentação de terras e definir escavadoras, nos termos comerciais e normativos vigentes.

Capítulo 3: *Caraterização e Classificação de Materiais de Escavação*, aborda-se de uma forma sucinta e expedita os materiais de escavação, tendo em conta a importância económica da caraterização e classificação, dados geológicos e geotécnicos de solos e rochas e princípios gerais das regras de medição a aplicar.

Capítulo 4: *Parâmetros de Produção*, apresentam-se os princípios para o cálculo de produção de uma escavadora (m^3/h), tendo em conta a capacidade da escavadora, as condições operacionais e os materiais escavados.

Capítulo 5: *Custos*, estabelece-se os critérios para o cálculo dos custos de uma escavadora e apresentam-se os resultados da modelação de um método direto para o cálculo de custos horários.

Capítulo 6: *Seleção de Equipamentos*, descreve-se os princípios base para a seleção de escavadoras, tendo em conta, além dos valores de produção e custos, características importantes do ponto de vista técnico. Nesta secção faz-se também uma breve abordagem ao dimensionamento de equipas, escavadoras e camiões, e aos modelos, de planeamento e otimização, desenvolvidos nesta área.

Capítulo 7: *Software, EXCselector*, faz-se a apresentação de uma ferramenta informática, desenvolvida no âmbito desta dissertação, destinada ao cálculo de custos, volumes e tempos, associados a operações de escavação com escavadoras giratórias.

Capítulo 8: *Conclusão*, apresenta-se um conjunto de conclusões e propostas de desenvolvimentos futuros, resultantes do trabalho desenvolvido.

2. EQUIPAMENTOS DE ESCAVAÇÃO

2.1. Definição de Equipamentos de Movimentação de Terras

A norma ISO 6165:2006 ⁽¹⁾ “*Earth-moving machinery - Basic types - Identification and terms and definitions*”¹ estabelece os termos, definições e uma estrutura de identificação para classificar máquinas de movimentação de terras, projetadas para realizar as seguintes operações:

- “escavação;
- carregamento;
- transporte;
- e perfuração, espalhamento, compactação ou abertura de valas, de terras e outros materiais, por exemplo, durante o trabalho em rodovias, barragens ou obras de construção”.

Esta norma divide ainda as máquinas por grupos de acordo com sua função e configurações de projeto:

- “trator com lâmina;
- pá carregadora;
- retroescavadora;
- escavadora;
- *trencher*²;
- dumper;
- scraper;
- motoniveladora;
- compactador de aterro;
- cilindro;
- assentador de tubos;
- assentador de tubos rotativo;
- e perfuradora direcional horizontal”.

Para o presente estudo são de especial interesse as máquinas do grupo das escavadoras, definidas no ponto 4.4 da norma como: “*máquina automotriz de rodas, rastos ou sapatas, com uma estrutura superior capaz de girar 360º, que é projetada principalmente para escavação com balde e sem necessitar de movimentar o material rodante durante o ciclo de trabalho*”. Este ponto acrescenta ainda duas notas:

- nota 1: “*O ciclo de trabalho de uma escavadora normalmente consiste em escavação, elevação, rotação e descarga de materiais*”;

¹ ISO 6165:2012 “*Equipamentos de movimentação de terras - Tipos básicos – Identificação, termos e definições*”

² Máquina para abertura de valas; Valetadeira ou valetador

- nota 2: “Uma escavadora também pode ser utilizada para manuseamento/transporte de objetos e materiais”.

2.2. Escavadoras: Caracterização

2.2.1. Introdução

As escavadoras, também denominadas de giratórias, surgiram na primeira metade do século XIX. De início eram movidas a vapor e montadas sobre carris ferroviários. Com o aparecimento de motor Diesel, patenteado em 1893 pelo engenheiro alemão Rudolf Diesel, estas máquinas tornaram-se mais potentes, compactas e com maior mobilidade, assumindo assim um papel primordial nas grandes escavações, como foi a abertura do canal do Panamá. ⁽²⁾

Desde o início dos anos 60 do século passado, tornaram-se comuns as escavadoras totalmente hidráulicas, mais compactas e robustas que as escavadoras de cabos clássicas. Estas tornaram-se obsoletas e não têm interesse prático neste trabalho porque estão hoje em dia, vocacionadas para alguns trabalhos mineiros e dragagens. ⁽³⁾

As escavadoras giratórias hidráulicas dividem-se em duas partes bem definidas (ver Anexo 1):

- parte inferior ou chassi, também designada por “carro de translação” ⁽³⁾ ou “infraestrutura” ⁽²⁾;
- e parte superior, designada por “estrutura giratória” ⁽³⁾ ou “superestrutura” ⁽²⁾.

A parte inferior está usualmente montada sobre rastos ou rodas podendo ainda em alguns casos ser adaptada a chassis tipo camiã, vagão ou barça. A superestrutura superior comporta o elemento motriz, o circuito hidráulico, a cabine do manobrador, contrapeso e a ferramenta de escavação.

Como se pode ler no ponto 29 da especificação LNEC, E 286 ⁽⁴⁾ “Terminologia rodoviária / Equipamento de obra”: “os diversos tipos de escavadoras designam-se pela natureza ou posição dos dispositivos de ataque”. É de interesse referir os dispositivos de tipo frontal e retro, que mais à frente serão distinguidos.

2.2.2. Escavadoras de Rastos

As escavadoras não são máquinas concebidas para empurrar ou transportar terras, nem percorrer grandes distâncias, podendo estas efetuar numerosos ciclos de produção no mesmo local. Por essa razão, os rastos servem apenas para pequenas deslocções a baixa velocidade.

Apesar do enorme peso destes equipamentos, a grande área de contacto com o solo permite que as pressões sejam relativamente baixas, a rondar o 1 kg/cm², dotando-as de favorável flutuação em terrenos com baixa capacidade de suporte, boa estabilidade e razoável capacidade de tração. ^{(2) (3) (5)}

Os rastros podem ser de dois tipos: metálicos (ver Figura 1 Esq.) ou de borracha (ver Figura 1 Dir.). Os primeiros são mais comuns, podem apresentar diferentes perfis e equipam máquinas de todos os tamanhos, desde menos de uma tonelada até várias centenas. Por outro lado, os rastros de borracha equipam máquinas mais compactas, até cerca de 10 toneladas. Têm como grande vantagem em relação aos primeiros a característica de poderem andar sobre pisos acabados sem os danificar, como calçadas, pavês ou betuminosos.



Figura 1: Rastos metálicos (Esq.) e rastros de borracha (Dir.).⁽⁶⁾

2.2.3. Escavadoras de Rodas

Este tipo de máquina tem como principal vantagem, em relação às máquinas de rastros, a sua grande mobilidade e capacidade de se deslocar em pisos acabados sem os danificar. A sua montagem está limitada a lanças retroescavadoras, em máquinas de 8 a 24 toneladas (ver Figura 2).

Para aumentar a sua estabilidade estes equipamentos vêm montados com estabilizadores, 4 sapatas (patolas) ou duas sapatas e uma lâmina, que tem a dupla função de estabilizar e poder empurrar pequenos volumes de terras.



Figura 2: Escavadora de rodas.⁽⁷⁾

2.2.4. Escavadoras Frontais

Montadas exclusivamente sobre rastros, são indicadas para escavações a cotas superiores, taludes, podendo também escavar a profundidades reduzidas (ver Figura 3). Para escavar o balde

movimenta-se para a dianteira no sentido ascendente. Estes são habitualmente de grande volume e têm abertura pelo fundo, o que permite uma descarga mais rápida e suave.

A sua capacidade de escavação em terrenos duros supera as máquinas retroescavadoras, estando o seu uso mais vocacionado para trabalhos mineiros e extração de inertes. A sua aplicação em obras públicas está pouco explorada. ⁽³⁾



Figura 3: Escavadora frontal. ⁽⁸⁾

2.2.5. Escavadoras, Retroescavadoras

Neste tipo de escavadoras o balde está virado para baixo, movimentando-se no sentido descendente e em direção ao corpo da máquina ⁽⁴⁾. Este movimento de “puxe” permite a escavação tanto a cotas mais altas como a cotas mais baixas (ver Figura 4). Estas escavadoras podem ser montadas sobre todos os suportes já referidos, ter ferramentas de escavação com diferentes características e receber vários tipos de baldes e acessórios.

O termo retro, ou retroescavadora, é utilizado comercialmente para designar outro tipo de máquina, estas são definidas na norma ISO 6165:2012 ⁽¹⁾ como: “*máquina automotriz de rodas ou rastos que possui um chassi projetado para suportar equipamento de carregamento montado na dianteira e equipamento de retroescavação montado na traseira*”. Por outro lado a especificação LNEC E 286 ⁽⁴⁾ define retroescavadora como: “*escavadora de colher com balde invertido que ataca o terreno de cima para baixo*”. Este termo pode assim gerar confusão pois pode, ao mesmo tempo, definir um tipo de máquina ou o tipo de dispositivo de ataque.

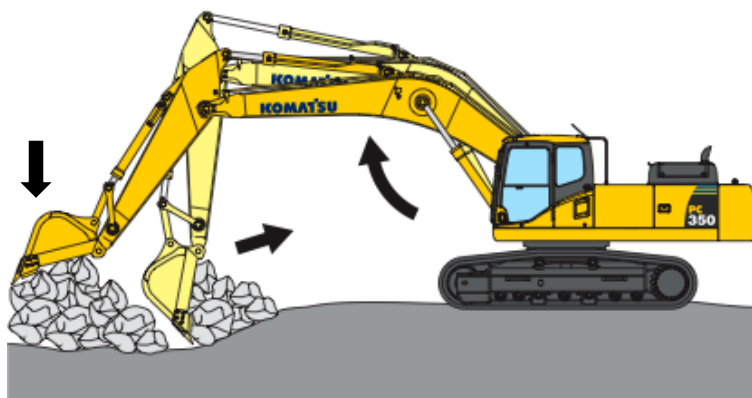


Figura 4: Movimento do dispositivo de ataque.⁽⁹⁾

De agora em diante, e de forma a evitar confusões e adotar a designação mais aceita comercialmente, sempre que se fizer referência a “escavadoras” estar-se-á a fazer alusão a escavadoras giratórias, hidráulicas, de rastos e com equipamento de retroescavação.

Estas máquinas são as mais difundidas e mais versáteis para todo o tipo de obras que contenham escavações. A sua aplicação é muito variada podendo ir da escavação de materiais de dureza diversa; abertura de valas, caboucos e trincheiras; desmonte de rochas; elevação e assentamento de materiais, como tubos ou armaduras; acabamento de taludes; entre outras.

2.2.5.1. Ferramenta de Escavação

A ferramenta de escavação, ou dispositivo de ataque, é dividida em três partes. A primeira é a lança, que pode ser inteira, de uma peça, ou bipartida, de duas peças e está ligada ao corpo da máquina (ver Figura 5). A segunda parte é o braço que faz a ligação entre a lança e o balde, terceira parte. As várias partes são articuladas nas extremidades, pivôs de rotação, e impulsionadas por cilindros hidráulicos (ver Anexo 1).

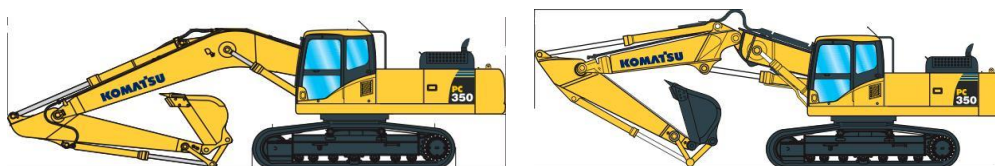


Figura 5: Escavadora com lança inteira (Esq.) e bipartida (Dir.).⁽⁹⁾

2.2.5.2. Baldes

Os baldes de retroescavação podem ter várias formas dependendo do tipo de terreno e do serviço a executar. De série, as máquinas vêm equipadas com um balde “*standard*”, com dentes, e preparado para todo o tipo de trabalhos correntes. Para trabalhos em rocha é aconselhado um balde reforçado, estreito e com dentes maiores e mais fortes (ver Figura 6).⁽¹⁰⁾

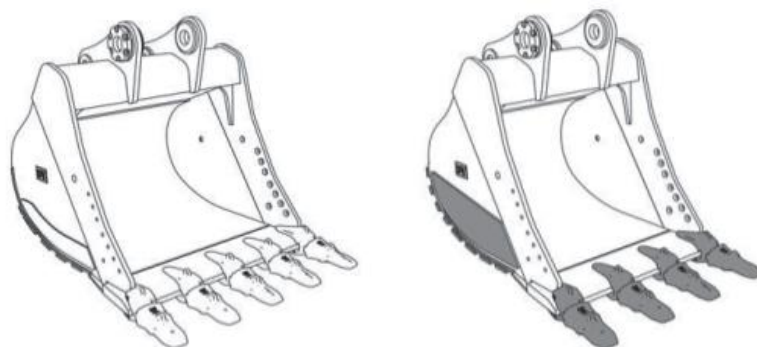


Figura 6: Balde "standard" (Esq.); Balde para escavação em rocha (Dir.).⁽¹⁰⁾

Outros isentam a utilização de dentes, como os destinados à regularização de taludes e paredes de canais. Ou apresentam furos para o escoamento da água na escavação de solos saturados (ver Figura 7).⁽¹¹⁾

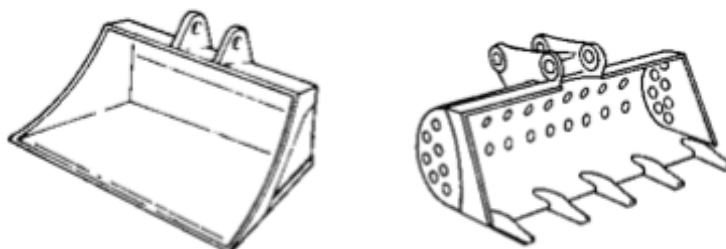


Figura 7: Balde de regularização (Esq.); Balde perfurado (Dir.).⁽¹¹⁾

Outros ainda, podem apresentar formas trapezoidais para escavação e limpeza de valas ou forma de maxilas com funcionamento hidráulico para escavação e remoção de materiais soltos (ver Figura 8).⁽¹¹⁾

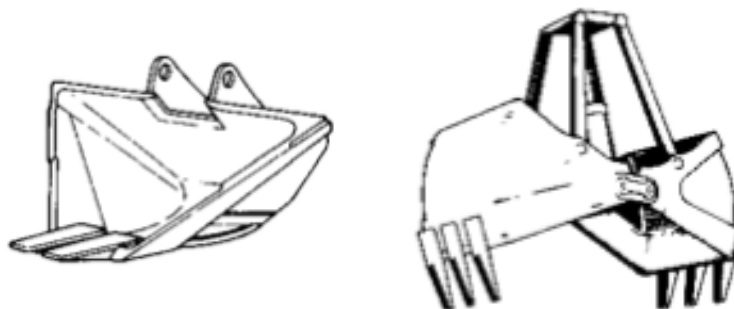


Figura 8: Balde trapezoidal (Esq.); Balde de maxilas (Dir.).⁽¹¹⁾

2.2.5.3. Acessórios

O grande número de acessórios confere a este tipo de máquinas uma grande adaptação a trabalhos mais específicos. Para o trabalho em pedreiras e terrenos rochosos é proveitosa a utilização de acessórios como o riper (ver Figura 9 Esq.) ou o martelo hidráulico (ver Figura 9 Dir.). Para trabalhos de demolição existe a cisalha para esmagar betão. No manuseio de materiais metálicos é útil a uso de tesoura ou íman. Existem ainda outros acessórios para diversos trabalhos, como o crivo para separação de inertes, acessórios para trabalhos florestais, cravação de estacas e compactação de solos.



Figura 9: Riper (Esq.); Martelo Hidráulico (Dir.).⁽¹²⁾

2.2.6. Miniescavadoras

Assim designadas comercialmente, são máquinas bastante ligeiras, ideais para pequenos trabalhos, que de outra forma, só poderiam ser executados recorrendo a ferramentas manuais. Normalmente montadas sobre rastos de borracha, as miniescavadoras podem ainda incorporar uma lâmina com dupla função, empurrar terras e estabilizar a máquina.

Algumas marcas comerciais utilizam esta designação para máquinas até 9 toneladas, outras reservam-na para equipamentos até aos 3500 kg. A norma ISO 6165:2006⁽¹⁾, no ponto 3.1.2, define escavadoras compactas como sendo aquelas com uma massa de operação menor que 6000 kg.

2.2.7. Escavadoras de Raio Compacto

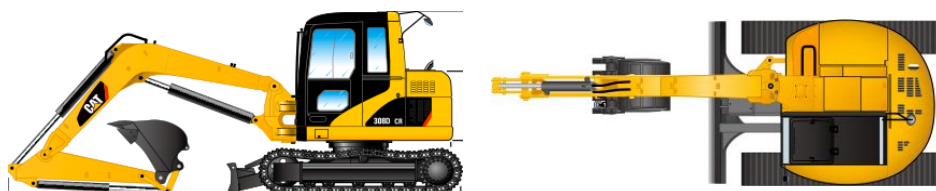


Figura 10: MSR_X; Vista lateral (Esq.); Vista superior (Dir.).⁽⁶⁾

Com essa designação comercial as giratórias de raio compacto são definidas no ponto 4.4.1 da norma ISO 6165:2006⁽¹⁾ como “MSR_X” (*minimal swing radius excavator*) isto é: “escavadora

projetada para espaços reduzidos que possuem uma estrutura superior com um raio de giração mais curto, girando dentro de 120% da largura do material rodante” (ver Figura 10).

2.3. Escavadoras: Especificações Comerciais

2.3.1. Introdução

As especificações comerciais, terminologia e as referências normativas a seguir, referentes a escavadoras hidráulicas, estão definidas na norma ISO 7135:2009 ⁽¹³⁾ “*Earth-moving machinery - Hydraulic excavators - Terminology and commercial specifications*”³. Por vezes os dados facultados pelos fornecedores de equipamentos são limitados, insuficientes e podem não estar em completo acordo com as referências normativas em vigor. De um modo geral, os que melhor caracterizam uma escavadora são: o seu peso operacional, potência do motor e capacidade do balde. Estes serão os aspetos tidos em conta para o desenvolvimento deste trabalho.

Contudo, os catálogos contêm dimensões de transporte, dimensões de alcance, capacidades de levantamento, podendo ainda incluir: áreas e pressões de contacto, tração, ruído, forças de arranque e ataque, velocidade máxima, capacidades do sistema hidráulico, entre outros.

2.3.2. Peso Operacional

O peso operacional de um equipamento, acessórios e componentes, e os métodos para a sua determinação, vêm definidos na norma ISO 6016:2008 ⁽¹⁴⁾ “*Earth-moving machinery - Methods of measuring the masses of whole machines, their equipment and components*”⁴. No peso operacional de uma escavadora hidráulica de rastros, está incluído o peso do corpo da máquina, ferramenta de escavação, o peso de todos os fluidos no nível máximo (líquido de refrigeração, combustível, lubrificantes e óleo do sistema hidráulico), peso dos rastros padrão, balde *standard* e operador de 75kg.

2.3.3. Motor

Numa escavadora a função do motor não é fornecer diretamente força motriz ao equipamento, mas sim a de fornecer energia ao sistema hidráulico. Os motores Diesel, desenvolvidos para funcionar em regime quase constante durante longos períodos, podem-se distinguir pelo número de cilindros, cilindrada (cm³), e potência (Watt). É habitual, mas pouco correto, referir a potência em cavalos, confundindo muitas vezes as unidades de cv (cavalo-vapor) e hp (horse-power), pois estas unidades são equivalentes, mas não são iguais, não fazendo parte do sistema internacional (SI). A potência

³ ISO 7135:2009 “*Equipamentos de movimentação de terras – Escavadoras hidráulicas – Terminologia e especificações comerciais*”

⁴ ISO 6016:2008 “*Equipamentos de movimentação de terras – Métodos de medição das massas de máquinas inteiras, equipamentos e componentes*”

líquida deve ser expressa em kW e aferida tal como especifica a norma ISO 9249:2007 ⁽¹⁵⁾ “*Earth-moving machinery - Engine test code - Net power*”⁵.

$$1 \text{ kW} = 1,34 \text{ hp} = 1,36 \text{ cv} \quad (\text{Eq. 1})$$

2.3.4. Capacidade do Balde

A capacidade do balde, ou capacidade nominal (Q_N), refere-se ao volume de materiais que podem estar contidos num balde de retroescavação, em m^3 . A norma ISO 7451:2007 ⁽¹⁶⁾ “*Earth-moving machinery - Volumetric ratings for hoe-type and grab-type buckets of hydraulic excavators and backhoe loaders*”⁶ estabelece um método para o cálculo de Q_N . As avaliações de volume são baseadas nas dimensões internas do balde e nos volumes representativos no topo do mesmo, coroamento de 1:1, independentemente do material escavado (ver Figura 11).

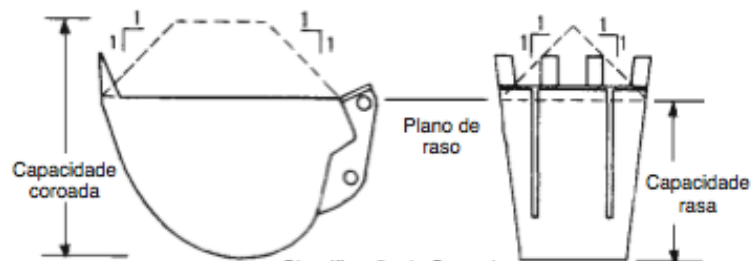


Figura 11: Capacidade do Balde. ⁽¹⁷⁾

Muitos dos catálogos fazem referência à norma SAE J296 ⁽¹⁸⁾, porém esta foi substituída pela ISO 7451:2007 ⁽¹⁶⁾, apresentando as duas normas o mesmo método para o cálculo para Q_N .

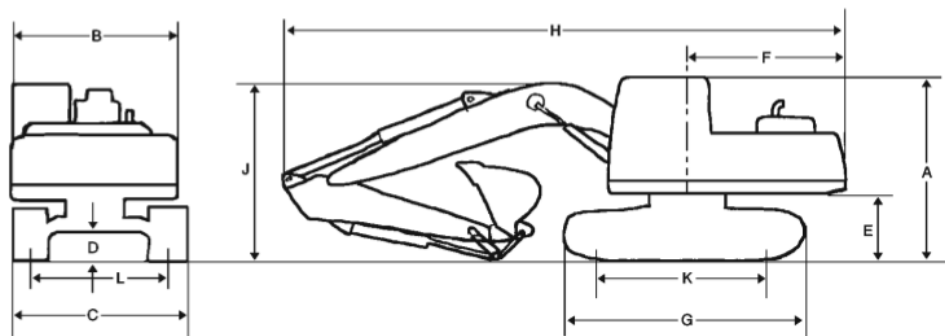
As escavadoras não estão limitadas a um tipo de balde. Os catálogos fornecem várias opções de dimensão, características e volumes (ver Anexo 4, Quadro A4-2). Para o desenvolvimento deste trabalho considerar-se-á, os baldes tipo *standard*, que vêm de série.

2.3.5. Dimensões de Transporte

As dimensões de transporte referem-se às dimensões do equipamento, em repouso e na sua forma condensada (ver Figura 12). Esta configuração permite transportar alguns equipamentos em reboques apropriadas e dentro dos limites legais. Os de maior dimensão exigem que o seu transporte seja assinalado com um, ou dois carros piloto, outros ainda necessitam que o transporte seja feito por módulos. Estas dimensões são distinguidas na norma ISO 7135:2009. ⁽¹³⁾

⁵ ISO 9249:2007 “Equipamentos de movimentação de terras – Código de ensaio de motor — Potência líquida”

⁶ ISO 7451:2007 “Equipamentos de movimentação de terras – Capacidades volumétricas para baldes de retroescavação e de mandíbula de escavadoras hidráulicas e retroescavadoras”

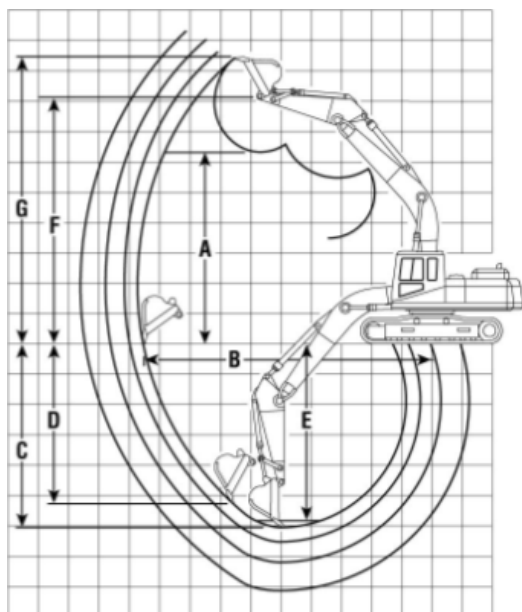


- A – Altura da cabine
- B – Largura da estrutura giratória
- C – Largura do chassi, com rastos padrão
- D – Altura livre sobre o solo, chassi
- E – Altura livre sobre o solo, estrutura giratória
- F – Raio de giração
- G – Comprimento total do rasto
- H – Comprimento total de transporte
- J – Altura de transporte
- K – Comprimento do rasto no solo
- L – Bitola do rasto

Figura 12: Dimensões de transporte.⁽¹⁰⁾

2.3.6. Dimensões de Alcance

Também na norma ISO 7135:2009⁽¹³⁾ vêm descritas a dimensões limite do equipamento em funcionamento. As mais referidas em termos comerciais, e que melhor definem o equipamento, são o alcance máximo ao nível do solo e a profundidade máxima de escavação (ver Figura 13).



- A – Elevação máxima de carregamento do balde com dentes
- B – Alcance máximo ao nível do solo
- C – Profundidade máxima de escavação
- D – Parede vertical máxima
- E – Profundidade máxima de corte para um fundo nivelado de 2,44 m
- F – Elevação máxima do ponto de rotação do balde
- G – Elevação máxima até aos dentes do balde no ponto mais alto do arco

Figura 13: Dimensões de alcance.⁽¹⁰⁾

2.3.7. Capacidade de Levantamento

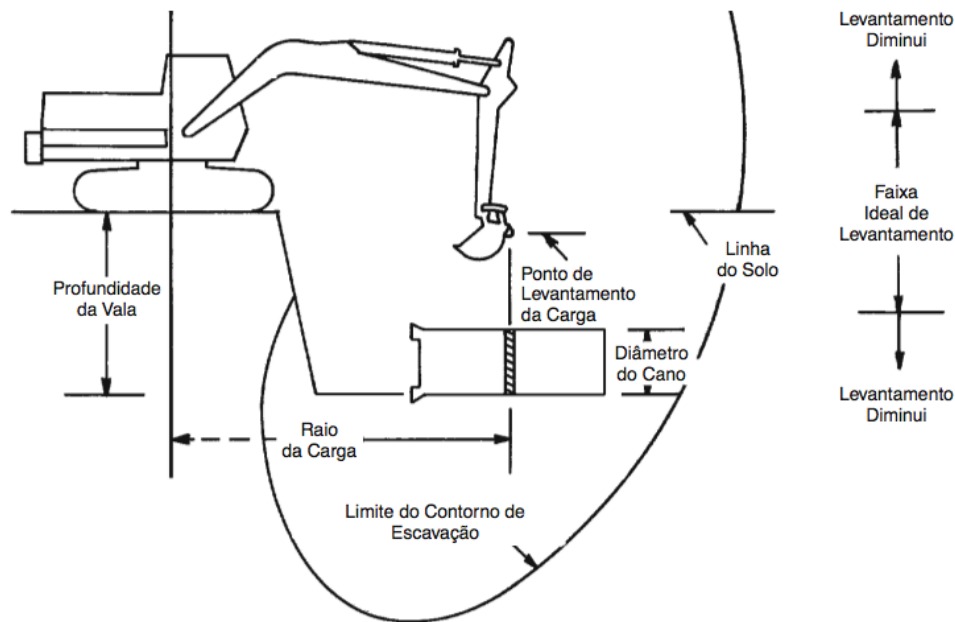


Figura 14: Máquina hipotética, variação da capacidade de levantamento. ⁽¹⁷⁾

Em muitos trabalhos é preciso levantar, girar e posicionar pesadas cargas, este tipo de ação pode ser crítico e dilatar a dimensão da máquina a utilizar (ver Figura 14). A norma ISO 10567:2007 ⁽¹⁹⁾ “*Earth-moving machinery - Hydraulic excavators - Lift capacity*”⁷ descreve um método uniforme para o cálculo da capacidade de levantamento. A carga nominal do mecanismo de levantamento é estabelecida tendo em conta o raio do pivô de apoio da carga, a sua altura em relação ao solo e a posição do corpo da máquina em relação ao chassi (ver Quadro 1). Esta não deve exceder 75% da carga de tombamento e 87% da capacidade do sistema hidráulico.

Quadro 1: Capacidade de levantamento (máquina hipotética). ⁽²⁰⁾

	1.5 m		3.0 m		4.5 m		6.0 m		7.5 m		9.0 m				
													m		
7.5 m							*4100	*4100					*3800	*3800	6.06
6.0 m							*4850	*4850					*3500	*3500	7.21
4.5 m							*5300	4850	*5000	3350			*3450	3050	7.92
3.0 m					*7850	7100	*6150	4650	5200	3300			*3550	2800	8.29
1.5 m					*9550	6600	*7000	4400	5100	3150			*3800	2650	8.38
0 m			*5950	*5950	*10450	6350	7000	4250	5000	3100			*4250	2700	8.19
-1.5 m	*6600	*6600	*10700	*10700	*10500	6300	6900	4150	4950	3050			4800	2950	7.71
-3.0 m	*11450	*11450	*13900	12400	*9800	6350	6950	4200					5700	3500	6.87
-4.5 m			*11000	*11000	*7850	6550							*6050	4950	5.50

Altura do pivô de apoio da carga

Carregamento de frente

Carregamento de lado

Alcance máximo na horizontal

* Limitado pelo circuito hidráulico

⁷ “Equipamentos de movimentação de terras – Escavadoras hidráulicas – Capacidade de levantamento”

2.3.8. Forças da Ferramenta de Escavação

Descritas no Manual de Produção da Caterpillar ⁽¹⁷⁾ ⁽¹⁰⁾ como força de ataque do braço e força arranque do balde, são distinguidas nos pontos 3.2 e 3.4 da norma ISO 6015:2006 ⁽²¹⁾ “*Earth-moving machinery - Hydraulic excavators and backhoe loaders - Methods of determining tool forces*”⁸. O ponto 3.2 da norma, descreve a força da ferramenta utilizando o cilindro do braço, ataque, como: “força gerada na borda do balde com o cilindro do braço posicionado para fornecer um momento de rotação ao redor do pivô do braço” (ver Figura 15 à Esq.). O ponto 3.4, descreve a força da ferramenta utilizando o cilindro do balde, arranque, como: “força da ferramenta gerada na borda do balde com o(s) cilindro(s) do balde posicionado(s) para fornecer um momento de rotação no balde ao redor de seu pivô” (ver Figura 15 à Dir.).

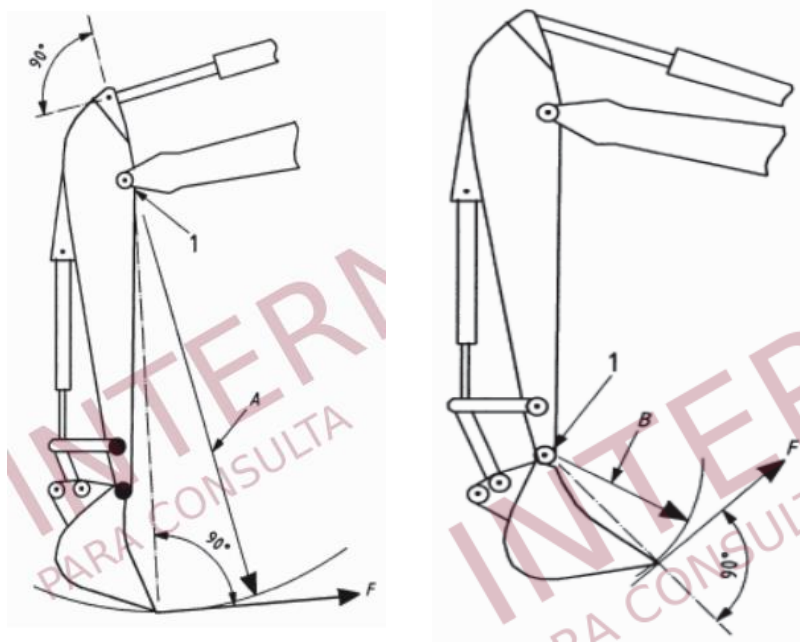


Figura 15: Força de ataque (Esq.) e força de arranque (Dir.); F – força da ferramenta; 1 – pivô de rotação; A e B – raios de rotação. ⁽²¹⁾

⁸ ISO 6015:2006 “Equipamentos de movimentação de terras – Escavadoras hidráulicas e retroescavadoras – Métodos para determinação da força da ferramenta”

3. CARACTERIZAÇÃO E CLASSIFICAÇÃO DE MATERIAIS DE ESCAVAÇÃO

3.1. Introdução e Importância Económica

Neste capítulo e de forma muito sintética, faz-se a análise dos materiais de escavação. Segundo Ricardo e Catalani ⁽²⁾: *“a necessidade de se classificarem os materiais de escavação, provém do simples fato de que os mais resistentes, oferecem maior dificuldade ao desmonte, demandam emprego de um número maior de horas de equipamento ou obrigam ao seu uso de modo mais intensivo, gerando, obviamente, maiores custos de escavação”*.

Para Greco ⁽²²⁾ os fatores que influenciam a escavação de um solo são o teor em humidade, vazios e tamanho e forma das partículas. Tendo também em conta propriedades como o peso específico e o empolamento.

Para este estudo é necessário recordar conceitos básicos de mecânica dos solos, ensaios, classificações e métodos de análise expedita. Não menos importante do ponto de vista económico, ter-se-á em conta regras de medição e controlo de execução em obra.

3.2. Génese e Constituição

As rochas, sejam elas de origem ígnea, sedimentar ou metamórfica, estão sujeitas a processos físicos e químicos, resultantes do meteorismo. As rochas em processo de meteorização sofrem a ação do vento, água, gelo e temperatura, resultando na remoção de material adjacente e sobrejacente, transporte, diminuição das partículas e sedimentação, dando assim origem a uma camada de solo. ⁽²³⁾

Os solos podem por sua vez, dar origem a rochas sedimentares, quando sujeitos a pressões e temperatura que provocam a cimentação entre partículas, diagénese. Ou a rochas metamórficas, quando as pressões e temperaturas atingem valores extremos, metamorfismo. *“Essas rochas podem por sua vez ser uma fonte de novos solos”*. ⁽²³⁾

3.3. Solos

3.3.1. Dimensão das Partículas

As partículas de solo podem-se designar consoante a sua gama de dimensões (ver Quadro 2). Segundo Maranha das Neves ⁽²³⁾ as duas técnicas mais comuns para determinar a dimensão das partículas são a peneiração e a sedimentação, respetivamente, para partículas maiores que 0,06 mm

ou inferiores a 0,02. Neste trabalho faz-se referência à análise granulométrica por peneiração, especificação LNEC E 196 ⁽²⁴⁾ ou E 239 ⁽²⁵⁾.

Quadro 2: Gamas de dimensões. ⁽²⁶⁾

Argila	Silte			Areia			Seixo			Calhau	Pedra
	fino	médio	grosso	fina	média	grossa	fino	médio	grosso		
	0,002	0,006	0,02	0,06	0,2	0,6	2,0	6,0	20	60	150
	[mm]										

“Na peneiração a amostra de solo é passada através duma séria padronizada de peneiros com uma rede de malha progressivamente mais apertada e visa a determinação da percentagem ponderal das partículas com diferentes gamas de dimensão”. ⁽²³⁾

Com os resultados obtidos na peneiração, é possível traçar, em forma de gráfico, a distribuição das partículas sólidas, curva granulométrica (ver Figura 16), onde as ordenadas representam a percentagem de peso de material, passado ou retido, e as abcissas a dimensão das partículas.

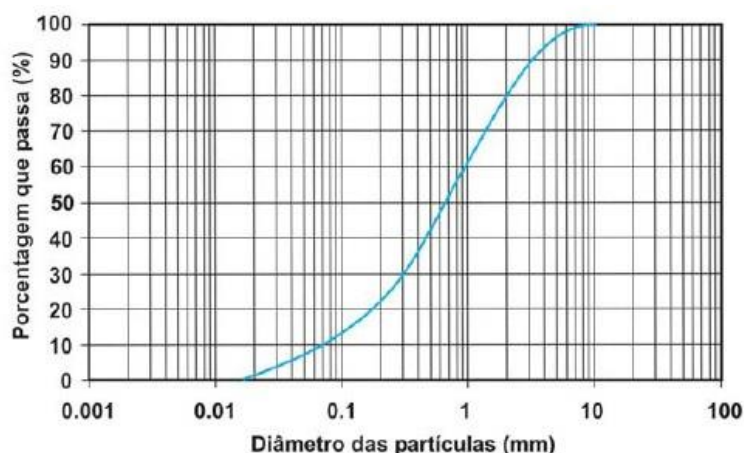


Figura 16: Exemplo de curva granulométrica. ⁽²⁶⁾

Um solo pode ser bem graduado, caso apresente uma curva granulométrica suave e côncava ou mal graduado, grosseiro ou bruto, quando a curva é acentuada, sugerindo uma percentagem elevada da mesma gama de dimensões.

Para definir uma curva são utilizados três parâmetros e dois coeficientes. O primeiro é o diâmetro efetivo, D_{10} , e representa o diâmetro da partícula cuja dimensão é maior que o diâmetro de 10% do peso total das partículas. “Este parâmetro é muito importante dada a influência das partículas de menor dimensão nas propriedades de engenharia dos solos” ⁽²³⁾. Os outros parâmetros são o D_{30} e D_{60} , com definições idênticas ao D_{10} para percentagens de 30 e 60%, respetivamente. Os coeficientes são o de uniformidade (C_U) e o de curvatura (C_C), dados pelas expressões (Eq. 2) e (Eq. 3).

$$C_U = \frac{D_{60}}{D_{10}} ; \quad C_C = \frac{D_{30}^2}{D_{10} \times D_{60}} \quad (\text{Eq. 2}) (\text{Eq. 3})$$

3.3.2. Relação Entre Fases

Os solos são constituídos por partículas de dimensão variada, fase sólida, e por vazios. Os vazios podem estar preenchidos de ar, fase gasosa, ou de água, fase líquida. Quando os vazios estão totalmente preenchidos de ar, diz-se que o solo é seco, quando contém apenas água o solo está saturado. Quando existe ar e água nos vazios, diz-se que o solo está parcialmente saturado ou húmido. ⁽²³⁾

Quando sujeitos a compressão, os solos, sofrem uma variação de volume devido a um rearranjo na disposição das partículas e diminuição do volume de vazios. Consequentemente a rigidez e resistência aumentam e a permeabilidade diminui. Esta relação, entre o volume de partículas sólidas ($V_{\text{Sólidos}}$), e o volume de vazios (V_V), é dada pelo índice de vazios (e) igual ao cociente entre V_V e $V_{\text{Sólidos}}$. Para solos saturados o V_V é substituído pelo volume de água, V_W . ⁽²³⁾

3.3.3. Limites de Consistência

Também a água tem uma grande importância no comportamento e escavabilidade de um solo, por exemplo um solo argiloso pode ter um comportamento friável e quebradiço, moldável e plástico ou líquido e viscoso, dependendo da quantidade de água contida no mesmo. Estes comportamentos podem ser demarcado através dos limites de Atterberg, que estabelecem fronteiras, de teores em água, abaixo do qual o solo tem um comportamento friável, limite de plasticidade (LP), e acima do qual se comporta como um líquido, limite de liquidez (LL). ⁽²³⁾ Estes limites, e os processos de determinação dos mesmos, são definidos na NP 143 ⁽²⁷⁾.

Para solos grosseiros, siltes e cascalhos, o comportamento em relação ao teor em água depende da granulometria. No caso das argilas este comportamento é diferente para cada tipo de argila, dependendo da sua mineralogia. Através dos limites anteriormente referidos é possível estudar o comportamento das partículas independentemente da sua composição mineralógica. ⁽²³⁾

Para uma posterior classificação do solo é necessário ter em conta o índice de plasticidade, I_p . Segundo Maranha das Neves ⁽²³⁾ este “define a gama de teor em água de um solo para o qual este *exibe um comportamento plástico*” e é dado pela expressão (Eq. 4).

$$I_p = LL - LP \quad (\text{Eq. 4})$$

3.3.4. Classificação de Solos

Segundo Maranha das Neves ⁽²³⁾ a classificação de um solo pode ser feita com dois graus de aproximação diferentes. O primeiro, passa pela descrição do solo de forma expedita, quanto à dimensão das partículas visíveis, cor, moldagem (ver Quadro 3), entre outras.

O segundo método recorre a um sistema de classificação, que fornece regras para uma correta identificação de solos. Faz-se de seguida referência a um destes sistemas: Classificação Unificada de Solos, USCS⁹. De acordo com o referido autor ⁽²³⁾ a USCS tem uma aplicação generalizada e é o sistema predominantemente utilizado em Portugal. Esta tem por base a análise granulométrica e os limites de consistência. Recorrendo a símbolos (ver Quadro 4) para o grupo de dimensão de partículas, combinados com outros para descrever a graduação granulométrica, plasticidade e presença de matéria orgânica.

Quadro 3: Consistência de um solo. ⁽²³⁾

Consistência	Identificação
Muito mole	Extrusão entre os dedos
Mole	Facilmente moldável
Firme	Moldável apenas com grande pressão dos dedos
Rija	Não moldável com os dedos
Muito rija	Friável e muito duro

Quadro 4: Símbolos para descrição de solos. ⁽²³⁾

Designação	Descrição	Símbolo
Dimensão das partículas	Cascalho	G
	Areia	S
	Silte	M
	Argila	C
Graduação	Bem graduada	W
	Mal graduada	P
Plasticidade	Elevada	H
	Baixa	L
Matéria orgânica		O

No Anexo 2 apresentam-se os fluxogramas para a classificação sistemática de solos pela USCS (ver Quadro A2- 2 e Quadro A2- 3), bem como a carta de plasticidade (ver Quadro A2- 1) necessária para a aplicação do método. No Quadro 5 são feitas algumas considerações ao tipo de solo e à sua trabalhabilidade.

⁹ USCS – *Unified Soil Classification System*

Quadro 5: Trabalhabilidade (+++ Excelente; ++ Boa; + Razoável; - Má).⁽²⁶⁾

Solo	Trabalhabilidade	Solo	Trabalhabilidade
GW	+++	SC	+
GP	++	ML	+
GM	++	CL	+ / -
GC	++	OL	+
SW	+++	MH	-
SP	+	CH	-
SM	+	OH	-

3.4. Rochas

A identificação e conhecimento das propriedades, das rochas e dos maciços rochosos permitem planejar e avaliar métodos de desmonte e escavação. “Os critérios mais correntes de classificação do *“material rocha”* baseiam-se, na sua maioria, nos parâmetros módulo de elasticidade (E), resistência à compressão simples (σ_c) e velocidade de propagação das ondas ultrassônicas (v_p e v_s)”⁽²⁸⁾. Nos maciços rochosos é importante ter em conta o seu grau de alteração e a sua estrutura, podendo esta classificação ser baseada no método proposto pela ISRM¹⁰. Este método estabelece ainda parâmetros, para uma análise expedita da qualidade da rocha e estimativa de resistência à compressão (σ_c) (ver Quadro 6).⁽²⁸⁾

Quadro 6: Classificação ISRM.⁽²⁸⁾

Grau	Resistência	σ_c (Mpa)	Análise Expedita
R6	Extremamente elevada	>250	A rocha lasca depois de sucessivos golpes de martelo e ressoa quando batida
R5	Muito elevada	100 – 250	Requer muitos golpes de martelo para partir espécimes intactos de rocha
R4	Elevada	50 – 100	Pedaços pequenos de rocha seguros com a mão são partidos com um único golpe de martelo
R3	Mediana	25 – 50	Um golpe firme com o pico do martelo de geólogo faz identações até 5 mm; com a faca consegue-se raspar a superfície
R2	Baixa	5 – 25	Com a faca é possível cortar o material, mas este é demasiado duro para lhe dar a forma de provete para ensaio triaxial
R1	Muito baixa	1 – 5	O material desagrega-se com golpe firme do pico de martelo de geólogo
R0	Extremamente baixa	0,25 – 1	Consegue-se marcar com a unha

¹⁰ ISRM - International Society Rock Mechanics

3.5. Sísmica de Refração

O método de refração sísmica, baseia-se na medição da velocidade de propagação das ondas ultrassónicas P e S (v_P e v_S em m/s). Através da análise das ondas sísmicas é possível identificar falhas, descontinuidades, camadas, alterações de consolidação e porosidade, tanto laterais como em profundidade. ⁽²⁸⁾

É possível estabelecer uma correspondência entre v_P e a dificuldade de desmonte e escavação de rochas e solos. Escavadoras hidráulicas, tipo retroescavadoras, podem ser empregues no desmonte e escavação de materiais com v_P a rondar os 1000 m/s, já as de tipo frontal, maiores e mais potentes, podem superar valores na ordem dos 2000 m/s. Para além destes valores de v_P o terreno tem de ser preparado antes de ser escavado. Com o recurso de Bulldozer com ripper é possível escarificar terrenos com v_P a rondar os 3000 m/s, porém este valor pode ser excessivo tendo em conta os custos operacionais e elevado desgaste do equipamento. Se o terreno apresentar valores de v_P superiores aos aconselhados para o emprego de meios mecânicos, recorre-se a explosivos. Quando a utilização de explosivos está interdita, por razões de segurança (meio urbano ou perigo de derrocadas), ou é economicamente inviável (pequenos volumes), torna-se mais favorável o emprego de escavadoras com martelo ou ripper. Estes limites variam de máquina para máquina e podem ser alterados mediante a presença de água nos solos. ⁽³⁾

No Anexo 2 (ver Quadro A2- 4) são fornecidos valores de v_P característicos para diversos materiais.

3.6. Empolamento

O empolamento, ou expansão volumétrica, caracteriza-se pelo aumento de volume sofrido por um material ao ser removido de seu estado natural ⁽²²⁾ ⁽²⁾. Este pode ser expresso pelo fator de empolamento: relação entre o volume no estado natural (V_n), e o volume solto (V_s) ou pesos específicos (γ_n e γ_s):

$$V_s = \text{Empolamento} \times V_n \leftrightarrow \text{Empolamento} = \frac{V_s}{V_n} = \frac{\gamma_n}{\gamma_s} \quad (\text{Eq. 5})$$

No Anexo 2 (ver Quadro A2- 5) são fornecidos fatores de empolamento para diversos materiais.

3.7. Regras de Medição

Em Portugal não existe nenhum documento de valor oficial (norma, especificação, DL ou DR) que defina critérios e regras de medição para escavações e movimentação de terras. No entanto surgiram, desde o final dos anos 60, algumas publicações do LNEC a este respeito, mas que não obtiveram consenso. Desta forma, algumas entidades, públicas e privadas, estabeleceram os seus próprios critérios para regras de medição. ⁽²⁹⁾

No panorama internacional existem alguns países com normas implementadas, a nível europeu destacam-se a Bélgica, norma NBN B 06-001, e o Reino Unido e República da Irlanda, regulamentos SMM¹¹ e CESMM¹². Também a comunidade europeia tem feito esforços para uniformizar os critérios e regulamentos dentro do espaço europeu. ⁽²⁹⁾

O documento de referência em Portugal é o “Curso sobre regras de medição na construção” ⁽³⁰⁾ editado pelo LNEC, na versão mais recente, datada de 2011. Este estabelece as regras gerais para as medições de movimento de terras. Distinguindo em rubricas diferentes, terraplanagens e movimento de terras para infraestruturas. De acordo com as condições de execução ou com os meios a utilizar na realização dos trabalhos. Refere também as informações do projeto, que devem ser referidas nas medições, relativas a:

- “planimetria e altimetria;
- natureza e hidrologia do terreno;
- existência de redes de distribuição de águas, esgotos, eletricidade, telefones e gás ou outras instalações e quaisquer construções ou obstáculos que possam ser atingidos durante a execução dos trabalhos;
- existência de terrenos infestados ou infetados;
- e localização de construções na vizinhança do edifício que possam ser afetadas pelas escavações”.

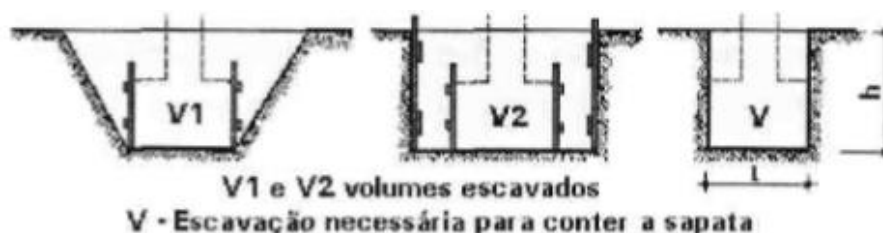


Figura 17: Diferentes modos de execução da escavação para implantação de uma sapata. ⁽³⁰⁾

Acrescentando: “as medidas para a determinação das medições serão obtidas a partir das formas geométricas indicadas no projeto, sem consideração de empolamento”. Isto quer dizer que o volume de terras a ser contabilizado é diferente do volume de terras a ser escavado e do volume de terras a ser transportado. Por exemplo, para a implantação de uma sapata, deve ser contabilizado, para medições, o volume da sapata (área da base vezes a profundidade), independentemente do volume de terras movido, ou dos métodos utilizados, talude ou entivação (ver na Figura 17). Dessa forma os valores de custo unitários, €/m³, praticados por uma determinada escavadora, são distintos, do preço unitário, também em €/m³, relativo a um determinado trabalho.

Fonseca ⁽³⁰⁾, refere ainda, que o aluguer de locais para depósito, as taxas de vazadouro ou o custo de terras de empréstimo e o transporte deverão ser contabilizados em rubricas à parte. E que os

¹¹ SMM – Standard Method of Measurement

¹² CESMM – Civil Engineering Standard Method of Measurement

trabalhos realizados em condições especiais devem ser medidos de forma própria e dependendo dos impedimentos suplementares.

Na medição dos trabalhos podem ser consideradas diferentes classes de terrenos, como indicado no Quadro 7. Esta classificação será também adotada para o desenvolvimento do *software* concebido no âmbito deste trabalho, tendo em conta as classes de terreno e a definição das suas características de forma expedita. Os terrenos da Classe A, devido às suas características, não permitem o uso de escavadoras com balde de escavação nos trabalhos de escavação/desmante destes materiais, estando a utilização destes equipamentos restrita aos terrenos das Classes B, C e D.

Quadro 7: Classes de terreno. ⁽³⁰⁾

Classe de terreno	Características	Materiais
Classe A	Terrenos cujo desmante só é possível por meio de guilho, martelo pneumático ou explosivos.	Rochas duras e sãs, rochas pouco duras ou medianamente alteradas e, eventualmente, solos coerentes rijos.
Classe B	Terrenos cuja escavação pode ser executada com picareta ou com meios mecânicos.	Rochas brandas ou muito alteradas, solos coerentes rijos, solos coerentes muito duros e, eventualmente, solos coerentes duros e misturas areia-seixo bem graduadas e compactas.
Classe C	Terrenos que podem ser escavados à picareta, à enxada ou por meios mecânicos.	Solos coerentes duros, solos coerentes de consistência média, areias e misturas areia-seixo bem graduadas e compactas e, eventualmente, areias uniformes compactas, turfas e depósitos turfosos, aterros e entulhos
Classe D	Terrenos facilmente escavados à pá, à enxada ou por meios mecânicos.	Areias e misturas areia-seixo bem graduadas mas soltas, areias uniformes compactas, areia uniformes soltas, solos coerentes moles, solos coerentes muito moles, lodos, turfas e depósitos turfosos, aterros e entulhos.

4. PARÂMETROS DE PRODUÇÃO

4.1. Introdução

A produtividade de escavação (P_E) define o volume de terras que uma escavadora movimenta em média (m^3), num determinado espaço de tempo (horas), numas determinadas condições. Depende do tempo de ciclo em segundos (t_{Ciclo}), da eficiência global do trabalho (E_G), e da capacidade útil do balde em m^3 (Q_u). A produtividade é normalmente expressa em m^3/h e pode ser obtida da seguinte forma: ^{(2) (10) (11) (17)}

$$P_E(m^3/h) = \frac{3600}{t_{Ciclo}} \times E_G \times Q_u \quad (\text{Eq. 6})$$

4.2. Ciclos de Produção

Como já referido, na norma ISO 6165:2012 ⁽¹⁾ pode ler-se: “O ciclo de trabalho de uma escavadora normalmente consiste em escavação, elevação, rotação e descarga de materiais”. Esta afirmação está correta mas a divisão cronológica dos movimentos não é exata. Para definir o ciclo de produção adotar-se-ão os quatro tempos (em segundos): ^{(2) (10) (17)}

- carregamento (t_C);
- rotação com balde carregado (t_{RC});
- descarga (t_D);
- e rotação com balde descarregado (t_{RD}).

O ciclo só estará concluído quando a máquina estiver posicionada de forma a iniciar um novo ciclo, ou seja pronta para iniciar o carregamento. A duração do t_{Ciclo} , é igual à soma dos quatro tempos:

$$t_{Ciclo}(s) = t_C + t_{RC} + t_D + t_{RD} \quad (\text{Eq. 7})$$

Cada tempo está dependente de diferentes condições, umas podem afetar a totalidade do ciclo, como é o caso do tamanho da máquina, experiência do manobrador, presença de obstáculos ou proximidade de pessoas. Outras influenciam particularmente uma das partes do ciclo. Por exemplo, um material compacto/plástico dificulta as operações de carregamento e descarregamento, aumentando t_C e t_D . A posição da máquina em relação ao local de escavação pode influenciar o t_C , pois um mau posicionamento ou uma profundidade ou altura elevada de escavação limitam as forças de ataque e arranque. Esta também influencia os tempos de rotação, t_{RC} e t_{RD} , pois aumenta amplitude dos movimentos da ferramenta de escavação. Para o t_{RC} e t_{RD} , o fator com maior influência é o ângulo de rotação da estrutura giratória, este está dependente das posições relativas, do local de carregamento e do local de descarregamento. ⁽²⁾

Para a determinação do t_{Ciclo} é feita a observação em obra, esta deve ser feita sem o conhecimento do manobrador, num período de tempo longo e nas várias condições de trabalho praticáveis. Para ter uma estimativa de t_{Ciclo} , algumas marcas fornecem dados relativos aos modelos que têm no mercado. Estes dados podem ser apresentados de várias formas, valores limite ou médias, relativos a diferentes condições operacionais. O t_{Ciclo} aumenta proporcionalmente ao tamanho da máquina, sendo idêntico para máquinas, de igual peso operacional. Esta razão " t_{Ciclo} /peso operacional" permite fazer uma extrapolação para máquinas com um t_{Ciclo} desconhecido.

4.2.1. Condições Operacionais

Quadro 8: Classificação das condições operacionais. ^{(2) (10) (17)}

Classificação	Condições Operacionais
I Escavação fácil	<ul style="list-style-type: none"> - Solo pouco compacto - Escavação até 40% da profundidade máxima da máquina - Ângulo de rotação menor que 30° - Descarga em pilha ou camião a um nível mais baixo - Ausência de obstruções
II Escavação média	<ul style="list-style-type: none"> - Solo compacto de argila dura com rocha fragmentada <25% - Escavação até 50% da profundidade máxima da máquina - Ângulo de rotação menor que 60° - Poucas obstruções
III Escavação média a dura	<ul style="list-style-type: none"> - Solo compacto com 50% de fragmentos de rocha - Escavação até 70% da profundidade máxima da máquina - Ângulo de rotação menor que 90° - Carregamento de camião muito perto da escavadora
IV Escavação difícil	<ul style="list-style-type: none"> - Solo compacto com 75% de fragmentos de rocha - Escavação até 90% da profundidade máxima da máquina - Ângulo de rotação menor que 120° - Escavação com entivações e escoramentos - Presença de pessoas na área de trabalho
V Escavação muito difícil	<ul style="list-style-type: none"> - Rocha alterada: arenitos, calcários, xistos, etc - Escavação acima dos 90% da profundidade máxima da máquina - Presença de obstruções - Presença de pessoas na área de trabalho - Área de despejo limitada

Como já foi referido, muitas são as condições que podem influenciar o tempo de ciclo, além disto a classificação das condições operacionais pode ainda ser diretamente relacionado com a eficiência de uma operação de escavação, que posteriormente se descreve. Tendo em conta estas condições,

Ricardo e Catalani ⁽²⁾ classificaram a escavação de fácil a muito difícil, esta terminologia é idêntica à utilizada no Manual de Produção Caterpillar ⁽¹⁷⁾ ⁽¹⁰⁾.

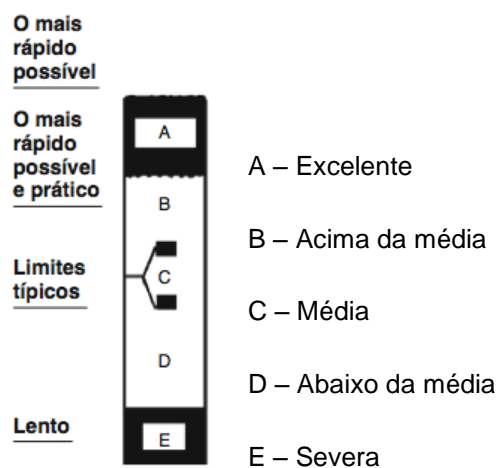
Em termos globais a classificação das condições operacionais de uma operação de escavação, corresponde à condição mais exigente das verificadas numa operação de escavação, as quais são enumeradas no Quadro 8.

4.2.2. Estimativa de Tempo de Ciclo

4.2.2.1. Segundo o Manual de Produção Caterpillar ⁽¹⁰⁾ ⁽¹⁷⁾

Este manual fornece uma estimativa de t_{Ciclo} para os equipamentos da marca, que é apresentada na forma de tabela (ver Anexo 3). Nela são esboçados, para cada equipamento, dependendo da categoria de peso operacional, os limites dos t_{Ciclo} frequentemente observados. Esta representação obedece aos limites observados no Quadro 9.

Quadro 9: Limites para t_{Ciclo} . ⁽¹⁷⁾



4.2.2.2. Segundo o Manual da Komatsu ⁽¹¹⁾

No caso do manual Komatsu, são apresentados dois métodos distintos para a estimação do t_{Ciclo} . Esta distinção, entre trabalhos de construção e de mineração, tem em conta, as condições operacionais de cada tipo de trabalho e o peso operacional dos equipamentos, acima das 300 ton para trabalhos de mineração. Considera-se de interesse prático descrever apenas a estimação do t_{Ciclo} para trabalhos de construção. Este método admite que o t_{Ciclo} é igual ao “ t_{Ciclo} standard”, em segundos, vezes um “fator de conversão” (ver Anexo 3). O primeiro depende do modelo de máquina e do ângulo de rotação, 45 a 90° ou 90 a 180°, e o segundo depende das condições de carregamento e descarregamento. Este fator pode variar entre 0,7 e 1,8.

4.2.2.3. Estimativa de tempo de ciclo

Tendo em conta os dados dos manuais de produção é possível tirar conclusões em relação ao t_{Ciclo} para condições operacionais médias, independentemente da marca e modelo do equipamento.

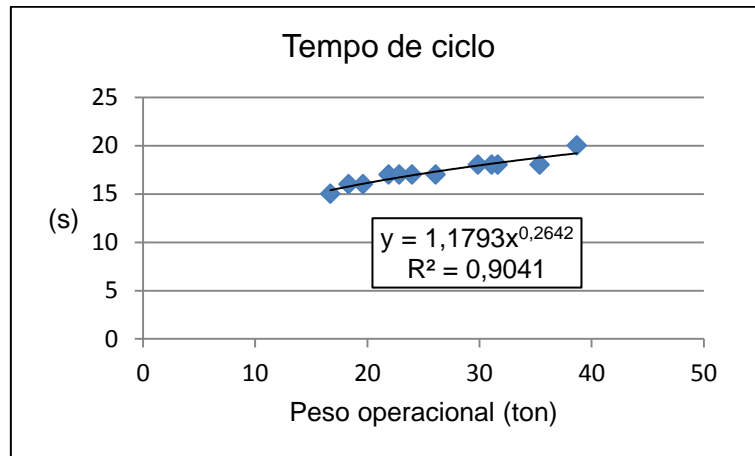


Figura 18: Peso operacional Vs Tempo de ciclo.

Quadro 10: Dados da amostra “tempo de ciclo”.

	Peso operacional (Kg)	Tempo de ciclo (s)
Max.	38686	20
Min.	16700	15
Méd.	26347	17,25
Dv. P.	6983	1,29
Amostra=12 / Correlação=95% / Resíduo médio =1,79%		

Pode-se assim observar, para a amostra representada no gráfico da Figura 18 e resumida no Quadro 10, uma correlação de 95% entre o peso operacional e o t_{Ciclo} . Desta forma, é possível admitir que o t_{Ciclo} , para uma rotação entre os 60 e 90°, é igual a:

$$t_{Ciclo}(s) = 1,1793 \times (kg)^{0,2642} \quad (\text{Eq. 8})$$

Os resultados obtidos através deste método, apresentam uma variação média, em relação aos apresentados nos manuais de produção, de 1,79%, valores estes, considerados aceitáveis para uma estimativa aproximada do t_{Ciclo} .

No Quadro 11, e para as diferentes condições operacionais, sugerem-se valores para o fator correção do t_{Ciclo} .

Para o desenvolvimento do *software* concebido no âmbito deste trabalho, considerar-se-á para a estiva do t_{Ciclo} a (Eq. 8) e o fator de correção apresentado.

Quadro 11: Fator de correção do t_{Ciclo} .

Condições operacionais		Fator
I	Escavação fácil	0,7
II	Escavação média	1
III	Escavação média a dura	1,1
IV	Escavação difícil	1,3
V	Escavação muito difícil	1,5

4.3. Eficiência

4.3.1. Eficiência Global (E_G)

A eficiência de uma operação de escavação, eficiência global (E_G), pode ser contabilizada tendo em conta vários fatores, como por exemplo: a disponibilidade horária do equipamento, eficiência horária (E_H); a fiabilidade mecânica do equipamento, eficiência mecânica (E_M); a habilidade do operador, eficiência do operador (E_O); podendo ainda contemplar fatores meteorológicos, declives e restrições de outra ordem:

$$E_G = E_H \times E_M \times E_O \times (...) \leq 1 \quad (\text{Eq. 9})$$

Outra forma de contabilizar a E_G , passa por assumir constantes os valores de E_H , E_M , e E_O , assumindo assim como principal variável da E_G , as condições operacionais verificadas.

Em Ricardo e Catalani ⁽²⁾ é apresentado um estudo da “U.S. Highway Research Board” que aponta para uma eficiência média de 60%, e citado ainda o manual de produção “Terex-GM”, que estabelece três categorias de eficiência, para trabalhos de terraplanagem e movimentação de terras, envolvendo vários equipamentos e sem entrar em conta com a E_H :

- $E_G = 92\%$ – “condições favoráveis (solos pouco compactos; caminhos bem conservados e secos; escavação a nível inferior; supervisão constante e eficiente)”;
- $E_G = 83\%$ – “condições médias (solos medianamente compactos; caminhos com material solto; escavação ao nível; supervisão intermitente)”;
- $E_G = 67\%$ – “condições desfavoráveis (materiais compactos ou muito húmidos; área de operação restrita; caminhos húmidos e escorregadios; escavação acima do nível; supervisão deficiente)”.

No manual da Komatsu ⁽¹¹⁾ são apresentados valores, considerados, mais representativos de E_G e catalogados segundo a classificação das condições operacionais adotadas (ver Quadro 12). Estes valores serão tidos em conta para o desenvolvimento do *software* concebido no âmbito deste trabalho.

Quadro 12: Eficiência global. ⁽¹¹⁾

Condições operacionais		E _G (%)
I	Escavação fácil	83
II e III	Escavação média a dura	75
IV	Escavação difícil	67
V	Escavação muito difícil	58

4.3.2. Eficiência Horária (E_H)

Em Ricardo e Catalani ⁽²⁾ a E_H é expressa como: “a relação entre o número de horas de trabalho efetivo e o número de horas que o equipamento fica à disposição da obra para a execução de uma tarefa, ou seja, o turno de trabalho admitido”. Isto quer dizer que a “hora” de trabalho deve incluir os tempos de paragem. Uma boa estimativa para ter em conta os tempos de paragem é admitir 45 a 50 minutos de trabalho efetivo por hora, o que equivale a uma E_H de 75% e 83%, respetivamente. Os tempos de paragem podem ter várias razões, tais como: fadiga do operador; espera de meios auxiliares, como camiões ou outros equipamentos de escavação; pequenas reparações e manutenção preventiva; receção ou transmissão de instruções.

4.3.3. Eficiência Mecânica (E_M)

A E_M do equipamento avalia a fiabilidade e a disponibilidade da máquina em obra. Isto é, segundo Barber ⁽⁵⁾: “a probabilidade de uma máquina funcionar num determinado intervalo de tempo sem sofrer interrupções no seu trabalho devido a avarias”; acrescenta ainda: “a fiabilidade está estreitamente ligada à manutenção, dureza do trabalho e à correta utilização por parte do operador”. Partindo do princípio que é feita uma correta manutenção, e que a dureza do trabalho e utilização por parte do operador são adequadas, dever-se-á ainda ter em conta o número de horas acumuladas pelo equipamento e o proporcional aumento da probabilidade de falha.

“Outro conceito também importante é a fiabilidade intrínseca, esta vem determinada pela simplicidade e compleição mecânica e pela qualidade de desenho e fabricação” ⁽⁵⁾. Este conceito entra em conta com a qualidade do equipamento. Não competindo a esta dissertação fazer uma avaliação dos fabricantes, parte-se do princípio, que todos têm implementadas políticas de gestão de qualidade e as características dos equipamentos estão de acordo com a normativa vigente.

A seguinte fórmula apresenta uma avaliação de E_M para o período de vida útil:

$$E_M = 1 - \frac{n^{\circ} \text{ de horas de paralisação por avaria}}{n^{\circ} \text{ de horas vida útil}} \quad (\text{Eq. 10})$$

Tendo em conta dados fornecidos pelos fabricantes, pode-se admitir que E_M dos equipamentos ronda os 95%.

4.3.4. Eficiência do Operador (E_O)

A habilidade do operador deve ser tida em conta, mas está dependente da forma como o t_{Ciclo} é determinado. Quando o t_{Ciclo} é medido experimentalmente a E_O é de 100% pois a sua influência na produção já está contabilizada no t_{Ciclo} . Quando este é estimado, há que ter em conta as condições da sua estimação, por exemplo, anteriormente foi assumido um operador de habilidade média para o cálculo do t_{Ciclo} , podendo assim admitir-se uma E_O acima de 100% para um operador excelente e abaixo disso para um operador mais fraco. Para o desenvolvimento deste trabalho, admitir-se-á sempre um operador “médio” e que a E_O já está contabilizada na determinação do t_{Ciclo} .

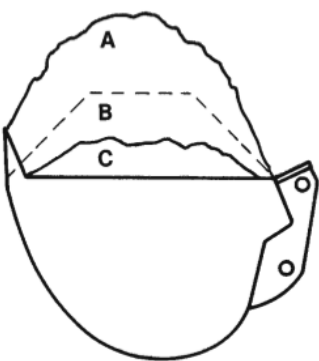
4.4. Capacidade Útil do Balde (Q_U)

A Q_U , é expressa em volume de solo escavado solto (m^3). Esta depende da capacidade nominal do balde (Q_N) (ver 2.3.4. Capacidade do Balde) e do tipo de material, e é descrita pela seguinte expressão:

$$Q_U(m^3) = Q_N \times F_{EB} \quad (\text{Eq. 11})$$

Onde F_{EB} é o fator de enchimento do balde, segundo a norma SAE J296 ⁽¹⁸⁾ (ver Quadro 13). Este depende do material escavado e corresponde à razão entre o volume real contido no balde e Q_N .

Quadro 13: Fator de enchimento. ⁽¹⁸⁾

	Material	F_{EB} – Fator de enchimento
	Argilas húmidas e argilas arenosa	A – 100 - 110%
	Areia e cascalho	B – 95 - 110%
	Argila dura, resistente	C – 80 - 90%
	Rocha, bem explodida	60 - 75%
	Rocha, mal explodida	40 - 50%

5. CUSTOS

5.1. Introdução

A presente secção pretende estabelecer critérios para o cálculo dos custos horários de uma escavadora. Este cálculo não tem como objetivo determinar um preço de venda/aluguer do equipamento, mas sim determinar um valor contabilístico que possa ser representativo do valor/hora ou valor/produção de um equipamento, para efeitos de estudos de viabilidade, projeto e gestão de obra: “*Nas grandes empresas de construção, o equipamento é debitado às obras por Preços de Transferência Interna (PTI) calculados ao nível do Departamento de Equipamento*”⁽³¹⁾.

Qualquer equipamento a operar terá custos fixos e custos variáveis. Os primeiros estão associados à disponibilidade do equipamento, podendo ser contabilizados de forma direta ou indireta em relação ao trabalho realizado. De forma direta os custos são calculados para cada trabalho e mediante o tempo de utilização efetiva, podendo-se assim designar como custos de propriedade (C_{PRP}). De forma indireta os custos são imputados à obra, custos de estaleiro, independentemente do tipo e duração dos trabalhos. Por outro lado os custos variáveis, ou custos de operação (C_{OP}), apenas depende do trabalho realizado.⁽³²⁾

Para os equipamentos de escavação também se deve incluir no seu custo horário, o custo do manobrador (C_{Man}), pois o manobrador está muitas vezes associado apenas aos serviços a executar com o equipamento, não efetuando outras tarefas em obra.

Para contabilizar o desempenho da equipa, homem/máquina, e selecionar o equipamento tendo em conta a produtividade desejada e o custo mais baixo possível, devem-se estimar todos os custos em ordem ao tempo de trabalho efetivo (€/h) e ter em conta que o custo horário total (C_{HT}), é igual à soma do C_{PRP} , C_{OP} e C_{Man} , que em seguida se descrevem.

$$C_{HT}(\text{€/h}) = C_{PRP} + C_{OP} + C_{Man} \quad (\text{Eq. 12})$$

5.2. Custo de Propriedade (C_{PRP})

Os C_{PRP} podem ser divididos em dois tipos, diretos (C_{PRP}^d) e indiretos (C_{PRP}^i). Os C_{PRP}^d são os que ocorrem pela imobilização do capital investido no equipamento, são calculados de acordo com a sua depreciação e amortização. Os C_{PRP}^i , exprimem encargos indiretos, inerentes à aquisição e propriedade do equipamento, como é o caso de juros, seguros e impostos.

5.2.1. Depreciação e Amortização

A depreciação refere-se à perda de valor de um determinado bem, por desgaste ou obsolescência. Enquanto a amortização pode ser entendida como a representação contabilística desta depreciação e consequente extinção da dívida durante o período de vida útil. Para o cálculo do C_{PRP}^d não é necessário fazer quaisquer considerações tributárias, podendo o cálculo estar “baseado unicamente no número de anos ou horas em que o proprietário espera usar a máquina de forma lucrativa”⁽¹⁷⁾. Além disso, devem-se ter também em conta, possíveis vantagens fiscais. Dessa forma, o método de cálculo sugerido é baseado no *Decreto Regulamentar nº 25/2009 de 14 de Setembro*, onde são definidas as condições (Artigo 1º), valorimetria (Artigo 2º), vida útil (Artigo 3º) e métodos para depreciações e amortizações correntes (Artigo 4º).

Artigo 1º — “Condições gerais de aceitação das depreciações e amortizações”:

1 — “Podem ser objeto de depreciação ou amortização os elementos do ativo sujeitos a deprecimento, considerando-se como tais os ativos fixos tangíveis, os ativos intangíveis e as propriedades de investimento contabilizadas ao custo histórico que, com carácter sistemático, sofrerem perdas de valor resultantes da sua utilização ou do decurso do tempo.”

Onde os equipamentos de escavação são considerados ativos tangíveis, com uma utilização esperada igual ao seu período de vida útil.

Artigo 2º — “Valorimetria dos elementos depreciáveis ou amortizáveis”

1 — “Para efeitos de cálculo das quotas máximas de depreciação ou amortização, os elementos do ativo devem ser valorizados do seguinte modo:”

- a) “Custo de aquisição ou de produção, consoante se trate, respetivamente, de elementos adquiridos a terceiros a título oneroso ou de elementos construídos ou produzidos pela própria empresa;”

2 — “O custo de aquisição de um elemento do ativo é o respetivo preço de compra, acrescido dos gastos acessórios suportados até à sua entrada em funcionamento ou utilização.”

Onde o custo de aquisição pode ser entendido como o preço de entrega do equipamento em plenas condições de laboração, incluindo montagem e transporte.

Artigo 3º — “Vida útil”

1 — “A vida útil de um elemento do ativo depreciável ou amortizável é, para efeitos fiscais, o período durante o qual se deprecia ou amortiza totalmente o seu valor, excluído, quando for caso disso, o respetivo valor residual.”

Há no entanto que diferenciar o período de vida útil fiscal do período de vida útil operacional. O primeiro, definido no artigo anterior, tem normalmente a duração de 5 anos. O segundo refere-se ao

número de horas de operação expectáveis, com um bom funcionamento mecânico e sem necessidade de grandes intervenções. Para este período, os valores sugeridos pelos fabricantes, ronda as 10 000 h, dependendo das condições de operação e manutenção. Uma boa aproximação, para os cálculos do C_{PRP}^d , é admitir que as 10 000 h operacionais estão divididas de igual forma durante o período de vida útil fiscal, correspondendo a 2 000 h/ano.

Relativamente ao valor residual, este pode ser entendido como a valor de venda ou troca no final da vida útil fiscal. “Embora muitos proprietários prefiram depreciar o seu equipamento até ao valor zero, outros reconhecem o valor residual como representativo do valor de revenda ou troca” ⁽¹⁷⁾. Esta afirmação deve-se ao facto de a troca de equipamento no final do período de amortização trazer incentivos fiscais e encaixe de capitais. Uma boa aproximação é considerar o valor residual, aproximadamente igual a 40% do preço de entrega.

Artigo 4º — “Métodos de cálculo das depreciações e amortizações”

1 — “O cálculo das depreciações e amortizações faz-se, em regra, pelo método das quotas constantes.”

2 — “Pode, no entanto, optar-se pelo cálculo das depreciações pelo método das quotas decrescentes, relativamente aos ativos fixos tangíveis novos...”

No presente texto, e para efeitos de cálculo de custo, é considerado o método das cotas constantes. Este permite repartir o valor investido, de igual forma, durante o período de operação, a uma taxa de 20% ao ano (5 anos), fixada no DR, Tabela I, código 1195: “equipamentos para trabalhos escavação e terraplanagem”.

Deste modo considerar-se-á:

$$C_{PROP}^d (\text{€/h}) = \frac{\text{Preço de entrega} - \text{Valor residual}}{\text{Vida útil em horas}} \quad (\text{Eq. 13})$$

5.2.2. Encargos Indiretos

Os encargos indiretos a considerar são de três tipos:

- juros;
- impostos;
- e seguros.

Os juros devem ser sempre contabilizados, desta forma é possível ter em conta o “preço do dinheiro”, tenha o equipamento sido adquirido com recurso a empréstimo ou a capitais próprios.

Para estimar o C_{PRP}^i , há que ter em conta um valor invariável ao longo do período de operação e os coeficientes a aplicar a cada encargo. Aplica-se como invariável o investimento médio anual (I_m), em

€ (Eq.14), dependente do valor investido, preço de entrega, e do número de anos de amortização (N_{anos}), com N_{anos} igual a 5. ^{(5) (10) (17)}

$$I_m(\text{€/ano}) = \frac{(N_{\text{anos}} + 1) \times \text{Preço de entrega}}{(2 \times N_{\text{anos}})} \quad (\text{Eq. 14})$$

Os coeficientes são expressos em percentagem (%) anual:

- juros – 8% (taxa de juro moratória fixada para 2º semestre de 2012);
- Seguros – aproximadamente 1%;
- Impostos – aproximadamente 1%.

Para o cálculo do C_{PRP}^i , admite-se:

$$C_{PRP}^i(\text{€/h}) = \frac{I_m \times (\%Juros + \%Seguros + \%Impostos)}{\text{Horas anuais de operação}} \quad (\text{Eq. 15})$$

5.3. Custo de Operação (C_{OP})

Os C_{OP} resultam diretamente da utilização do equipamento em obra. Estes incluem: despesas com consumíveis, combustíveis e lubrificantes; material de desgaste; e custos de manutenção e reparação.

5.3.1. Combustível

O custo horário com combustível (C_{Comb}) (Eq. 16) é um dos itens mais onerosos. Segundo dados recolhidos, corresponde a cerca de 46% de C_{HT} , podendo atingir mais de 85% de C_{OP} , estando estes valores muito dependentes das variações do preço de combustível.

$$C_{Comb}(\text{€/h}) = \text{Preço do combustível}(\text{€/l}) \times \text{Consumo}(\text{l/h}) \quad (\text{Eq. 16})$$

O consumo horário (17) de uma máquina pode ser estimado ou fornecido pelos fabricantes. Em alguma bibliografia é sugerida um consumo específico por kW, este valor podem rondar os 0,18 a 0,16 l/kW.h. ^{(2) (5)}

$$\text{Consumo}(\text{l/h}) = \text{Potência}(\text{kW}) \times \text{Consumo específico}(\text{l/kW.h}) \quad (\text{Eq. 17})$$

Comparativamente com dados recolhidos junto dos representantes das marcas e nos manuais de produção, estes valores de consumo de combustível são desadequados e exagerados. Isto deve-se à grande evolução tecnológica dos últimos anos, a nível de injeção de combustível e à introdução de

sistemas de gestão eletrónica: com opções de modos de funcionamento, controlo do regime do motor, regulação de fluxos hidráulicos e fácil interação com o operador.

Tendo em conta os consumos de 18 máquinas vendidas em Portugal, é possível observar uma correlação bastante significativa entre consumos e a potência (ver Figura 19 e Quadro 14).

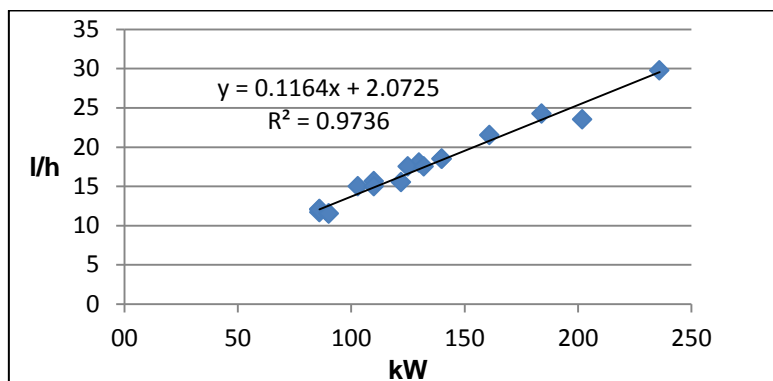


Figura 19: Gráfico dos consumos, kW Vs l/h.

Quadro 14: Dados da amostra “consumos”.

	Peso Operacional (kg)	Potência (kW)	Balde (m ³)	Consumo (l/h)
Máx.	38686	236,0	2,66	29,75
Mín.	16500	86,0	0,60	11,50
Méd.	25420	129,6	1,42	17,16
Desv. P.	6718	42,8	0,57	5,05
Correlação	96%	<u>99%</u>	57%	

Com os resultados recolhidos, obtêm-se a seguinte expressão para o cálculo dos consumos:

$$\text{Consumo (l/h)} = 0,1164 \times (\text{kw}) + 2,0725 \quad (\text{Eq. 18})$$

Com este método de cálculo de consumos, consegue-se obter resultados com um valor residual médio de 3,7% em relação aos valores de consumos da amostra. Adotar-se-á esta abordagem sempre que os consumos não sejam conhecidos.

5.3.2. Lubrificantes

Na contabilização do custo horário com lubrificantes (C_{Lub}), deve-se ter em conta o custo e periodicidade de troca dos óleos, filtros e massas lubrificantes, de todos os componentes mecânicos, como é o caso do motor, transmissão, comandos finais e sistema hidráulico. ^{(17) (10) (11)}

À semelhança do que acontece com o combustível, alguns fabricantes fornecem valores aproximados para o consumo horário de lubrificantes e número de filtros necessários para um determinado espaço de tempo.

O consumo de lubrificantes está dependente do estado mecânico da máquina, do seu grau de conservação, ambiente de trabalho e qualidade dos lubrificantes, tornando difícil a sua contabilização exata. De uma forma geral pode-se estabelecer uma relação entre os custos com lubrificantes e os custos com combustível. Os seus preços estão dependentes da cotação do petróleo e o seu consumo apresenta uma relação direta com a potência do motor, podendo assim admitir-se que os custos com lubrificantes rondam os 10 a 15% dos custos com combustível. ⁽⁵⁾

Os contratos de manutenção oferecidos pelos representantes das marcas, incluem consumíveis e mão de obra, para a mudança dos óleos, filtros, correias, sondas e alguma manutenção periódica e preventiva, assumindo-se assim este custo como o C_{Lub} , a um valor constante para o período de vida útil.

5.3.3. Manutenção e Reparação (MR)

Os custos de MR estão diretamente associados à probabilidade de falha do equipamento ou seus componentes. Estes incluem mão de obra e peças de substituição, não envolvendo as ações de manutenções periódicas. A necessidade de intervenções de MR varia muito com a utilização do equipamento e ao longo da vida útil, sendo baixa de início e aumentando gradualmente, podendo ainda apresentar picos referentes a intervenções pontuais mais onerosas. Deve-se também ter em conta o momento da intervenção de MR, antes ou depois da falha (ver Figura 20 Esq.). Para isso, e quando possível, é necessário conhecer o momento ideal de MR de um determinado componente (ver Figura 20 Dir.). ^{(10) (17)}

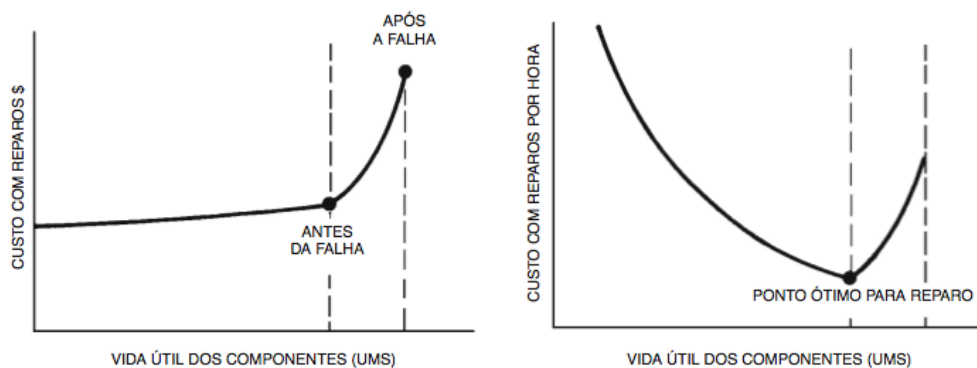


Figura 20: Efeitos da falha no custo de reparação (Esq.); Ponto ótimo para MR (Dir.). ⁽¹⁷⁾

Para efeitos de contabilização horária de custos, os custos relativos a MR são admitidos médios ao longo da vida útil. Deste modo, observa-se que o valor onerado para MR, no início é excessivo e no final insuficiente, podendo assim criar-se um fundo contabilístico de forma a suportar intervenções de MR futuras. ^{(2) (11)}

Para o cálculo do custo horário com MR (C_{MR}) pode-se fazer uma aproximação em relação ao preço de entrega do equipamento. Segundo valores transmitidos por representantes das marcas, os custos com MR podem variar muito, e até em casos mais graves, atingir os 95% ou mais do preço de

entrega. Para o cálculo de C_{MR} ; admitindo uma correta manutenção preventiva e uma utilização adequada durante a vida útil; assumindo que algumas ações de MR estão abrangidas pela garantia; e tendo em conta, valores de contratos de serviços de MR, fornecidos pelos representantes das marcas; assume-se para o cálculo de C_{MR} uma taxa de 30% do preço de entrega, repartida de igual forma no período de 10 000 h.

5.4. Custo do Manobrador (C_{Man})

O custo do manobrador pode ser, ou não, contabilizado no C_{HT} . Esta afirmação resulta do facto de o C_{Man} , poder estar diretamente imputado ao custo da máquina ou aos custos de estaleiro.

Neste trabalho assumir-se-á C_{Man} igual a 10 €/h, incluindo já a remuneração do manobrador, encargos fiscais e seguros.

5.5. Estimativas de Custos

Uma boa estimativa de custos é essencial na seleção e estudo de viabilidade de qualquer equipamento. É objeto deste trabalho, é apresentar um método para estimação de custos, recorrendo apenas às especificações comerciais. Anteriormente, foi sugerido e descrito um método para o cálculo do C_{PRP} e do C_{OP} de uma escavadora. Esta abordagem tem o inconveniente de entrar em conta com muitos fatores, de forma independente e pouco sistemática.

Quadro 15: Dados da amostra “custos”.

	Peso operacional kg	Potência kW	Capacidade do balde m ³	C_{PRP} €/h	C_{OP} €/h
Máx.	38686	236,0	1,49	27,54	53,79
Mín.	16500	86,0	0,52	9,14	21,54
Med.	24992	129,8	0,97	15,59	31,73
Desv. P.	6169	37,7	0,27	4,95	8,85

Em Sayadi *et al*⁽³³⁾ são apresentados dois modelos para a estimativa de custos: “*estes modelos de cálculo do C_{PRP} e do C_{OP} , recorrem à regressão exponencial univariável (UVER¹³), bem como à regressão linear multivariável (MVLRL¹⁴)*”. Esta abordagem será adotada considerando como variáveis independentes o peso operacional (kg) a potência do motor (kW) e a capacidade do balde (m³). Ter-se-á em conta uma amostra de 24 máquinas (ver Quadro 15), vendidas em Portugal e de 7 fabricantes diferentes (Caterpillar[™], Hitachi[™], Komatsu[™], Hidromek[™], Case[™], New Holland[™] e Volvo[™]). Para tal, foram calculados os valores atuais do C_{PRP} e do C_{OP} . Em alguns pontos, os custos foram fornecidos, diretamente, pelos representantes das marcas (C_{Lub} e C_{MR}).

No Quadro 16 é possível observar os valores de correlação entre variáveis e custos horários.

¹³ UVER – *Uni-Variable Exponential Regression*

¹⁴ MVLRL – *Multi-Variable Linear Regression*

Quadro 16: Correlações da amostra "custos".

	Peso operacional kg	Potência kW	Capacidade do balde m ³	C _{PRP} €/h	C _{OP} €/h
kg	100%	94%	93%	84%	97%
kW		100%	89%	74%	97%
m ³			100%	66%	87%
C _{PRP}				100%	86%
C _{OP}					100%

5.5.1. UVER

Tendo em conta o Quadro 15, a variável que apresenta uma correlação mais significativa em relação aos custos horários, é a variável peso operacional. Este resultado pode ser também observado no gráfico da Figura 21 e nas equações resultantes de UVER:

- Peso operacional: UVER (kg)

$$C_{PRP}(\text{€/h}) = 5,2627e^{4 \times 10^{-5}(kg)}; \quad R^2 = 71,81\% \quad (\text{Eq. 19})$$

$$C_{OP}(\text{€/h}) = 12,153e^{4 \times 10^{-5}(kg)}; \quad R^2 = 95,25\% \quad (\text{Eq. 20})$$

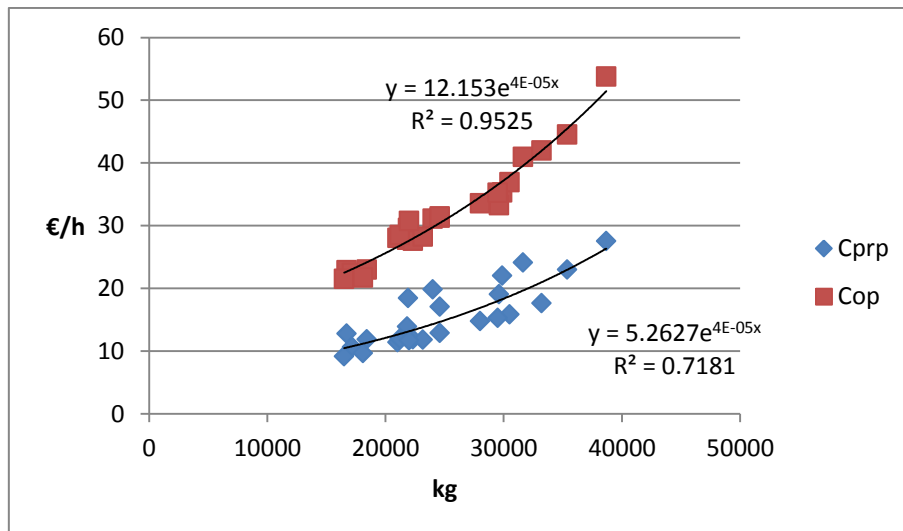


Figura 21: Peso operacional Vs Custos horários.

- Potência: UVER (kW)

$$C_{PRP}(\text{€/h}) = 7,0302e^{0,0058(kW)}; \quad R^2 = 51,71\% \quad (\text{Eq. 21})$$

$$C_{OP}(\text{€/h}) = 14,263e^{0,006(kW)}; \quad R^2 = 90,32\% \quad (\text{Eq. 22})$$

- Capacidade do balde: UVER (m³)

$$C_{PRP}(\text{€/h}) = 7,046e^{0,7734(m^3)}; \quad R^2 = 47,10\% \quad (\text{Eq. 23})$$

$$C_{OP}(\text{€/h}) = 14,47e^{0,7829(m^3)}; \quad R^2 = 79,71\% \quad (\text{Eq. 24})$$

5.5.2. MVL

O Quadro 17 resume os coeficientes de determinação do modelo MVL, aplicado ao cálculo dos custos horários.

Quadro 17: Coeficientes de determinação MVL.

<i>Estatística de regressão</i>	C_{PRP}	C_{OP}
R múltiplo	0,919924524	0,990412753
R²	0,84626113	0,980917422
R² ajustado	0,823200299	0,978055035
Erro-padrão	2,081590998	1,163456322
Observações	24	24

Nos Quadros 18 e 19 podem-se observar os sumários das MVL, relativas ao C_{PRP} e ao C_{OP} . Pelos valores do “teste t” (t de Student), é possível avaliar a significância dos coeficientes de regressão, concluindo que a variável “peso operacional” é a mais eficaz no cálculo dos custos. Este resultado condiz com as considerações feitas na análise pelo método UVER.

Com os resultados obtidos pela MVL pode-se fazer a estimativa do C_{PRP} e do C_{OP} , através das equações (Eq. 25) e (Eq. 26).

$$C_{PRP}(\text{€/h}) = -2,84100 + 0,00165(\text{kg}) - 0,05393(\text{kW}) - 16,37157(\text{m}^3); \quad R^2 = 84,63\% \quad (\text{Eq. 25})$$

$$C_{OP}(\text{€/h}) = 1,9567 + 0,0010(\text{kg}) + 0,1095(\text{kW}) - 8,6335(\text{m}^3); \quad R^2 = 98,09\% \quad (\text{Eq. 26})$$

Quadro 18: Sumário da MVL para C_{PRP} .

	Coeficientes	Erro-padrão	t de Student	valor P
Interceção	-2,840995989	1,874992858	-1,515203633	0,145366468
(kg)	0,001651744	0,000261976	6,304943448	3,73065E-06
(kW)	-0,053925594	0,034175905	-1,577883395	0,130278905
(m3)	-16,37156722	4,454229778	-3,675510254	0,00150037

Quadro 19: Sumário da MVL para C_{OP} .

	Coeficientes	Erro-padrão	t de Student	valor P
Interceção	1,956654109	1,047983152	1,86706638	0,076620961
(kg)	0,000956996	0,000146425	6,535727038	2,27559E-06
(kW)	0,109530002	0,019101818	5,734009162	1,30414E-05
(m3)	-8,633463695	2,489586956	-3,467829744	0,002429395

5.5.3. Análise de Resultados

Segundo Sayadi *et al* ⁽³³⁾ o desempenho do modelo é medido pelas taxas médias de erro absolutas, MAER¹⁵:

$$MAER = \frac{\sum |C_{estimado} - C_{atual}| / C_{atual}}{n^{\circ} \text{ de amostras}} \times 100 \quad (\text{Eq. 27})$$

Os valores de MAER obtidos a partir dos modelos UVER e MVLR são apresentados no Quadro 20.

Quadro 20: Valores de MAER para o C_{PRP} e C_{OP} para os métodos UVER e MVLR.

	UVER (kg)	UVER (kW)	UVER (m ³)	MVLR
C _{PRP}	<u>12,73%</u>	17,25%	18,44%	<u>9,23%</u>
C _{OP}	7,68%	<u>5,60%</u>	8,37%	<u>2,65%</u>

Como se pode observar (ver Quadro 19), os resultados de MAER são menores no método MVLR, tanto em relação ao C_{PRP} como ao C_{OP}. Estes resultados confirmam o método MVLR como aquele que melhor se aplica à estimação de custos horários. Em relação ao método UVER, e tendo em conta os valores mais baixos de MAER, é de assinalar a variável “peso operacional” como aquela que melhor se adequa à estimação do C_{PRP} e a variável “potência” à estimação do C_{OP}. Isto deve-se ao facto de o C_{PRP} ser dependente do preço de entrega do equipamento, que por sua vez é proporcional ao peso operacional, e de o C_{OP} estar estreitamente ligado ao consumo de combustível, podendo este ser avaliado em função da potência do motor.

Em relação à estimação do C_{PRP} e do C_{OP}, são notórias as diferenças verificadas, tanto no MAER como nos R² das equações de UVER e MVLR. Maiores valores de MAER e menores valores de R², na estimação, de C_{PRP} em relação C_{OP}, exibem uma fraqueza dos métodos quanto aos custos fixos. Isto deve-se ao fato de máquinas da mesma classe de peso operacional, potência e capacidade do balde, poderem apresentar diferentes preços de entrega, dependendo do fabricante e, conseqüentemente, C_{PRP} atuais distintos (ver Exemplo seguinte). A correção do C_{PRP}, tendo em conta o fabricante, não é plausível, uma vez que está fora do âmbito desta dissertação tecer considerações relativas aos mesmos. Além disso, as diferenças nos erros de estimação (MAER e R²) do C_{PRP} e C_{OP}, podem ser desvalorizadas, tendo em conta o peso médio de cada custo no C_{HT}, respetivamente 26,75% e 55,08% para o C_{PRP} e C_{OP} (C_{HT} inclui C_{Man}=10€/h).

O C_{OP} deve ser ainda atualizado, dependendo da variação do preço do combustível, tendo em conta que o seu cálculo foi feito com base num preço por litro igual a 1,4 €. Esta atualização é feita com base na seguinte equação:

¹⁵ MAER – Mean Absolute Error Rates

$$C_{OP}^{Novo} = C_{OP} \times \left(0,2 + \frac{0,8 \times \text{preço por litro}}{1,4} \right) \quad (\text{Eq. 28})$$

5.5.4. Exemplo

A máquina mais vendida em Portugal é a da classe de vinte e duas toneladas, da qual se apresentam, no Quadro 21, sete exemplos. Tendo em conta estas sete máquinas, podem ser observadas diferenças de preços de entrega na ordem dos 38%, daí a mais gravosa aparência dos erros do C_{PRP} .

Quadro 21: Máquinas da amostra, da classe de vinte e duas toneladas.

	Caterpillar	Hitachi	Komatsu	Volvo	Hidromek	Case	New Holland
	320D L	ZX 210 LC-3	PC 210 LC-8	EC 220D	HMK 220 LC	CX 210	E 215 C
kg	21 900	21 000	21 830	22 000	22 300	21 200	23 160
kW	103	122	110	128	114	119	118
m³	0,80	0,80	0,84	0,80	1,00	0,80	1,00

Admitindo agora uma máquina hipotética, desta classe, com peso operacional de 22 000 kg, um motor de 115 kW de potência e um balde com capacidade de 0,8 m³. É possível obter resultados pelo método MVLR que, em comparação com as médias de custos das sete máquinas da mesma classe, apresentam valores de MAER bastante aceitáveis (ver Quadro 22).

Quadro 22: Custo de máquina hipotética (MVLR), média de custos de máquinas da classe e MAER relativo ao exemplo.

	MVLR	Média Atual	MAER
C_{PRP}	14,20 €/h	13,02 €/h	9,06%
C_{OP}	28,70 €/h	28,64 €/h	0,21%
C_{HT}	52,90 €/h	51,66 €/h	2,40%

6. CRITÉRIOS DE SELEÇÃO

6.1. Introdução

Segundo Ricardo e Catalani ⁽²⁾: “o problema da seleção do equipamento de terraplanagem ideal, para a realização de uma determinada tarefa, está na análise de todos os fatores que exercem influência no seu comportamento”. Acrescentando ainda que os fatores que influenciam a escolha podem ser de três tipos:

- naturais (solos; rochas; topografia; nível freático);
- de projeto (volumes; profundidade de escavação; descarga; distâncias);
- e económicos (custos horários; custos unitários; desempenho).

Estes critérios aplicam-se tanto na escolha do equipamento, em quantidade e qualidade, como na escolha das equipas. Entenda-se por “equipa” o conjunto escavadora(s) e unidade(s) de transporte, camiões ou dumpers.

6.2. Seleção de Equipamentos

6.2.1. Seleção da Máquina

Para garantir que uma escavadora satisfaz as expectativas de uma determinada aplicação, é preciso saber a sua capacidade produtiva, os custos e as exigências necessárias para executar a tarefa. Se a escolha da máquina recair apenas nos critérios de produtividade e custos, não é garantia de que seja a melhor opção. Não basta aceitar que uma escavadora, que está na sua plena capacidade produtiva, deva ser a hipótese eleita. Por exemplo, certas condições operacionais exigentes, podem induzir a um grande desgaste e fadiga, aumentando a probabilidade de falha e conseqüente aumento de custos. Se assim for, deve-se optar por uma especificação diferente, uma classe de peso operacional superior e de características mais adequadas. Outra opção é adotar técnicas de escavação mais adequadas e menos exigentes, que apesar de menos produtivas, garante um melhor desempenho a longo prazo. ⁽³⁴⁾

Além dos critérios identificados, como aqueles que melhor descrevem uma escavadora: peso operacional, potência de motor e capacidade do balde, há ainda que ter em conta as especificações da ferramenta de escavação, combinação da lança, braço e balde (ver Anexo 4).

6.2.2. Seleção da Ferramenta de Escavação

O tamanho e robustez da lança e do braço são fatores chave para um ajuste da capacidade da máquina à natureza do trabalho (ver Anexo 4, Quadro A4- 1). Para a escavação, em condições

operacionais médias, deve-se optar por uma ferramenta que garanta a melhor produtividade do equipamento. Lança e braço curtos permitem a utilização de baldes de grande capacidade, sem comprometer o t_{Ciclo} , os consumos e a estabilidade do equipamento.

Quando é necessário um maior alcance, seja no plano da máquina, em profundidade ou altura, existem ferramentas de longo alcance, com lança e braços compridos. Porém esta opção tem grande influência na estabilidade e robustez do equipamento, limita o tamanho do balde e diminui a força de ataque, a capacidade de levantamento e o t_{Ciclo} .

Independentemente do tamanho da lança, um braço curto favorece sempre a força de ataque. Por essa razão, um braço curto é ideal para escavação de terrenos compactos e rochosos. Quando é necessário um maior alcance sem comprometer a capacidade de desmonte, opta-se por uma lança maior, ou bipartida, em combinação com um braço curto.

6.2.3. Seleção do Balde

Como já foi referido, a capacidade do balde é medida em m^3 , segundo os critérios da norma ISO 7451:2007 ⁽¹⁶⁾, ou norma SAE J296 ⁽¹⁸⁾ equivalente. Porém, o seu peso também é relevante, podendo limitar a densidade do material a ser escavado (ver Anexo 4, Quadro A4- 2). Este critério, peso do balde mais peso do material escavado, depende de cada máquina e surgem por razões de estabilidade e capacidade de levantamento (ver Figura 22).

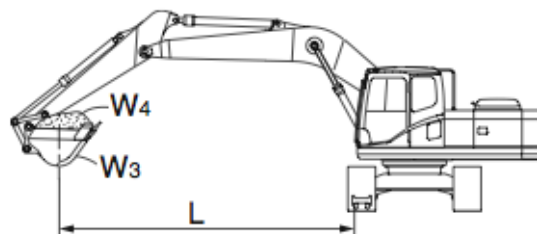


Figura 22: W3 – Peso do balde; W4 – Peso do material escavado; L – Alcance máximo com o balde carregado. ⁽¹¹⁾

Um balde de baixa capacidade, aparentemente limita produtividade. No entanto, baldes que estão além das capacidades realistas da escavadora e da sua ferramenta de escavação, podem também ter efeitos negativos na produtividade, dilatar o t_{Ciclo} , e ainda fazer aumentar os custos operacionais. Mesmo que a opção por um determinado balde pareça satisfatória, é possível que um de menor dimensão realize o trabalho de forma mais eficiente. Deve-se assim entrar em conta com mais duas considerações: largura e raio do balde. ⁽³⁴⁾

Quanto mais estreito for o balde, melhor é a sua capacidade de penetração no solo. Por isso baldes estreitos são recomendados para trabalhos duros, em solos muito compactos e rochosos. Permitem exercer uma maior pressão de contacto para as mesmas forças da ferramenta. Além disso, baldes muito largos podem gerar torções excessivas nos componentes da ferramenta de escavação e assim aumentar a probabilidade de falha. ⁽¹¹⁾

O raio do balde também afeta as forças de escavação. Isto é, quanto menor for o raio, distância entre o pivô de rotação e extremidade do balde (ver Figura 23), maior são as forças de ataque e arranque (ver Figura 15).⁽¹¹⁾⁽³⁴⁾

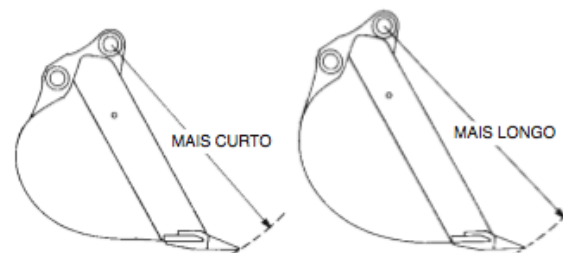


Figura 23: Raio do balde. ⁽¹⁷⁾

Os baldes podem ainda apresentar dentes de escavação, de diferentes tipos, dependendo do serviço a que se destinam (ver Anexo 4, Quadro A4- 3), e sistemas de acoplamento automático (ver Figura 24), que permitem a troca de baldes, ou outros acessórios, de forma autônoma, apenas com os comandos do operador. Porém, estes sistemas têm o inconveniente de ampliar o raio do balde e aumentar bastante o peso do conjunto balde/sistema de acoplamento, diminuindo o peso de material a escavar.



Figura 24: Sistemas de acoplamento, Universal (Esq.) e Dedicado (Dir.). ⁽³⁵⁾

6.3. Seleção de Equipas

Uma escavadora normalmente trabalha em conjunto com outros equipamentos de movimentação de terras, desmontes ou transporte, como: bulldozers, pás-carregadoras, perfuradoras, camiões basculantes, dumpers, entre outros. Esta secção destina-se a descrever um método simples para o dimensionamento de equipas de escavação. Para este trabalho, e como já tinha sido referido, deve-se entender por “equipa” o conjunto escavadora(s) e unidade(s) de transporte, camiões ou dumpers (ver Figura 25).

Além do problema do dimensionamento das equipas, há que ter em conta a sua gestão e otimização. Neste campo, Moselhi e Alshibani ⁽³⁷⁾, apresentam um modelo concebido para o acompanhamento, planeamento e controle de operações de terraplenagem. O modelo proposto utiliza e combina um

algoritmo genético¹⁶ (AG), e tecnologias espaciais: incluindo Sistema de Posicionamento Global (GPS) e Sistema de Informação Geográfica (SIG).



Figura 25: Camião basculante e escavadora (Esq.); Dumper (Dir.). ⁽³⁶⁾

Alkass *et al.* ⁽³⁸⁾ propõem um modelo baseado na teoria das filas, capaz de levar em conta as incertezas normalmente associados ao processo de seleção de equipamentos. Este modelo computadorizado, “FLSELECTOR”, é capaz de ajudar o utilizador na determinação do número e tamanho, de camiões e escavadoras. Mostrando ao utilizador todas as frotas viáveis para um determinado serviço.

Marzouk e Moselhi ⁽³⁹⁾ utilizam a simulação computacional e AG, para otimizar as operações de movimentação de terras, fornecendo uma ferramenta, voltada para a seleção de frotas quase ideais. O processo de simulação proposto utiliza a simulação de eventos discretos orientada por objetos. E o AG considera um conjunto de variáveis qualitativas e quantitativas que influenciam a produção de operações de terraplenagem. A estrutura, simulação/AG, permite considerar cenários, tempos e custos para uma determinada frota.

Prata *et al.* ⁽⁴⁰⁾ idealizaram um modelo, baseado em redes de Petri coloridas, capaz representar a dinâmica operacional de uma obra de terraplenagem. Este modelo tem como base a teoria dos sistemas discretos e uma modelação matemática de simulação. Este trabalho define também alguns equipamentos de terraplanagem, definindo as escavadoras como: “*equipamentos extremamente robustos, de alta produtividade e elevado custo operacional, destinados às operações de corte e carregamento. Seu emprego é justificável quando a quantidade de material a ser removida for considerável ou quando o tempo requerido para esta remoção for pequeno*”. Com base nesta afirmação pode-se concluir que a produtividade da escavadora, dentro da equipa, deve ser assegurada, tendo em vista a rentabilidade global.

Também em Prata *et al.* ⁽⁴⁰⁾ é apresentado um método simples de dimensionamento de equipas de pá-carregadora e camiões, tendo como base o trabalho de Ricardo e Catalani ⁽²⁾. Podendo este método ser adaptado ao carregamento de camiões com escavadora. Tendo por base a produtividade da escavadora (P_E), a capacidade do(s) e o tempo de ciclo do(s) camião(ões):

¹⁶ AG – Algoritmo Genético – Técnica utilizada na ciência da computação para encontrar soluções aproximadas em problemas de otimização

$$P_E(m^3/h) = \frac{3600}{t_{ciclo}} \times E_G \times Q_U \quad (\text{Eq. 29})$$

Determina-se o número de ciclos (n), para o carregamento do camião por parte da escavadora, tendo em conta a capacidade do camião (q), descrita em m^3 :

$$n = \frac{q}{Q_U} \quad (\text{Eq. 30})$$

Em seguida, determina-se o tempo de carregamento do camião, T_C :

$$T_C(s) = n \times t_{ciclo} \quad (\text{Eq. 31})$$

Deve-se ter em conta o tempo de viagem de cada camião (T_V). Este tempo inclui a ida, a descarga e o regresso. Depende da distância ao aterro, da velocidade média do camião, do tempo de descarga e das condições globais de transporte, como: rampas, paragens, piso, entre outras. Conhecidos os valores de T_C e T_V , é possível determinar o número de camiões (N), que garantem a produtividade de uma escavadora:

$$N = \frac{T_V}{T_C} \quad (\text{Eq. 32})$$

Como o N a adotar será um número inteiro, há que ter em consideração a escolha de um inteiro inferior ou superior ao valor obtido. No caso de se adotar o número inteiro imediatamente inferior, a escavadora não será rentabilizada ao máximo. Caso contrário, a rentabilidade dos camiões será comprometida e a escavadora irá comandar a produção. Esta é a melhor opção, pois permite a melhor rentabilização da escavadora, sendo preferível a ociosidade dos camiões uma vez que o seu custo horário é menor que o da escavadora.

Segundo Prata *et al.* ⁽⁴⁰⁾ este método apresenta algumas limitações:

- i. *“permite a ociosidade dos equipamento”;*
- ii. *“não considera as variações nos tempos devido a incertezas, por ser um modelo determinístico”;*
- iii. *“não permite uma análise dinâmica e operacional da equipa, dificultando o planeamento da obra”.*

7. SOFTWARE EXCselector

7.1. Introdução e Conceção

Um dos objetivos deste trabalho consiste em concentrar os dados de produção, materiais e custos num *software*, concebido para o cálculo de custos horários/unitários de escavação. Esta procura de um processo computadorizado que facilite o cálculo de custos de escavação, e auxilie na seleção e comparação de escavadoras giratórias, vai de encontro à realidade presente na Engenharia Civil.

Relativamente ao desenvolvimento do *software EXCselector*, recorreu-se ao *Microsoft™ Excel™*, para o tratamento de dados relativos: aos equipamentos (marca, peso operacional, potência e capacidade do balde); aos materiais de escavação (classe de solo, material, estado, massa específica, empolamento e fator de enchimento); e aos custos (C_{OP} , C_{PRP} e C_{HT}). Recorreu-se também à linguagem de programação *Python™*, para o desenvolvimento da ferramenta informática capaz de operar em ambiente *Windows™* (64 bits). Este *software*, reúne informações relativas às condições operacionais, aos volumes envolvidos, os métodos UVER e MLVR, e às bases de dados de equipamentos, materiais e custos. Assim é possível calcular e fornecer ao utilizador dados sobre as condições operacionais, produtividade, custos, t_{Ciclo} , eficiência, volumes e tempos (ver Figura 26).

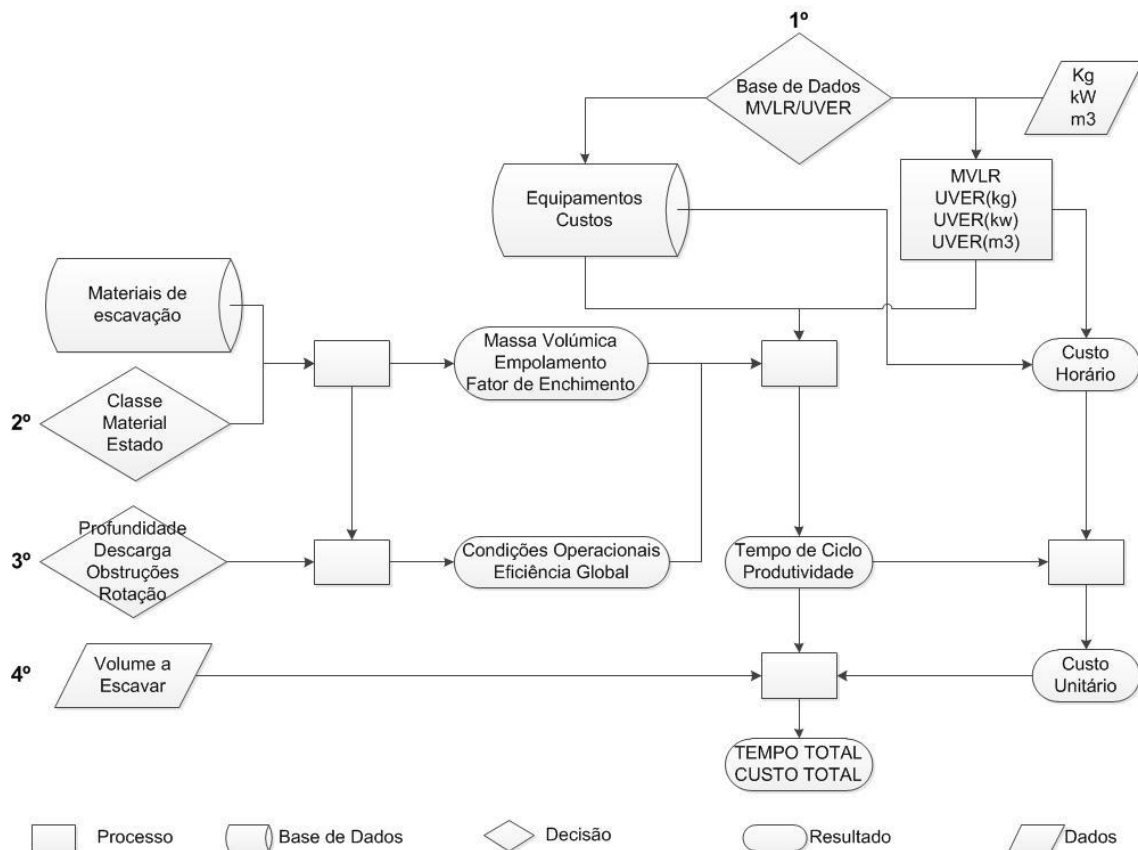


Figura 26: Fluxograma do EXCselector.

7.2. Instruções

Como se pode observar na Figura 27, a janela do *EXCselector* está dividida em duas partes, o que permite uma fácil interação e leitura por parte do utilizador.

À esquerda (*input*), pode-se observar as várias opções de cálculo (máquina ou dados da máquina, método de cálculo, classe do solo, material de escavação, estado do material, profundidade de escavação, altura de descarga, obstruções e rotação); o volume de terras que se pretende escavar, no estado natural; e os comandos “Limpar” e “Calcular”.

À direita (*output*), são apresentados os valores que resultam dos dados armazenados e dos cálculos:

- dados do equipamento (caso se opte por uma máquina da base de dados);
- C_{OP} , C_{PRP} e C_{HT} ;
- características do terreno;
- massa volúmica no estado solto e natural, o empolamento e o fator de enchimento correspondente ao material de escavação;
- as condições operacionais e a E_G da operação;
- produtividade e custo unitário tendo em conta o estado do solo;
- e as conclusões relativas ao volume, custo e tempo total da operação.

The screenshot shows the 'MainWindow' of the EXCselector software. It is divided into two main sections: input on the left and output on the right. The input section includes fields for 'Maquina', 'Kg' (22000), 'Kw' (115), 'm3' (0.8), 'Metodo' (MVL), 'Classe' (D), 'Material' (Areia e argila), 'Estado' (soltas), 'Profundidade' (Média), 'Descarga' (Mesmo nível), 'Obstruções' (Ausência de Obstruções), 'Rotação (graus)' (<90), and 'Volume a escavar, estado natural (m3)' (100). The output section displays calculated values: 'Custo de Operacao: 28.7Euros/hora', 'Custo de Propriedade: 14.2Euros/hora', 'Custo Horario total: 52.9Euros/hora', 'Terrenos facilmente escavados à pá, à enxada ou por meios mecânicos.', 'Massa volúmica: Estado Solto = 1600Kg/m3, Estado Natural = 2020Kg/m3', 'Empolamento = 1.26', 'Factor de enchimento = 105%', 'Condições operacionais: III', 'Eficiência Global: 75%', 'Tempo de ciclo: 18.2segundos', 'Produtividade: Estado Solto = 124.55m3/h, Estado Natural = 98.85m3/h', 'Custo unitário: Estado Solto = 0.42Euro/m3, Estado Natural = 0.54Euro/m3', 'Volume Solto = 126.0m3', 'Custo Total = 53.51Euros', and 'Tempo Total = 1.0horas'. At the bottom of the input section are 'Limpar' and 'Calcular' buttons.

Figura 27: Janela do *EXCselector*.

Como se pode observar no fluxograma (ver Figura 26) e na janela (ver Figura 27) do *EXCselector*, as opções de *input*, e conseqüentemente os resultados de *output*, podem ser divididas em quatro passos, que em seguida se passam a descrever:

1º Passo (Definição do equipamento e método de cálculo de custos horários):

- Este passo pode ser subdividido tendo em conta a opção de um equipamento da base de dados (caso a) ou a utilização de um dos métodos apresentados para o cálculo de custos horários (caso b) (ver Figura 28).

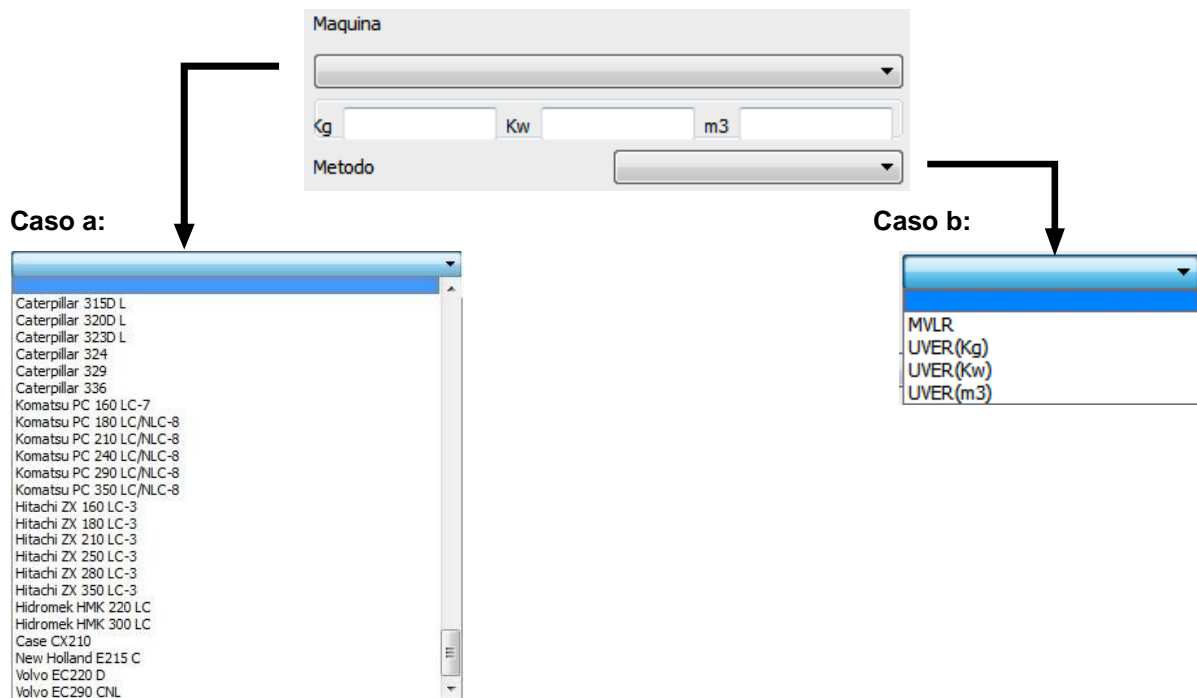


Figura 28: 1º Passo, *EXCselector*.

- **Caso a:**
 - *Input* – Escolha de um equipamento da base de dados.
 - *Output* – Dados do equipamento (peso operacional, potência e capacidade do balde), marca, modelo, hiperligação do representante da marca, C_{OP} , C_{PRP} e C_{HT} .
- **Caso b:**
 - *Input* – Introdução de dados do equipamento (peso operacional, potência e capacidade do balde) e escolha do método de regressão a utilizar.
 - *Output* – C_{OP} , C_{PRP} e C_{HT} .

2º Passo (Definição do material de escavação):

- Para a definição do material de escavação, as opções do *EXCselector* são interdependentes, estando as escolhas disponíveis num determinado item dependentes de outras anteriormente selecionadas (ver Figura 29).
 - *Input* – Opção da classe de terreno, do material a escavar e do estado desse material.

- *Output* – Características do terreno, massa volúmica (estado solto e estado natural), empolamento e fator de enchimento do material.

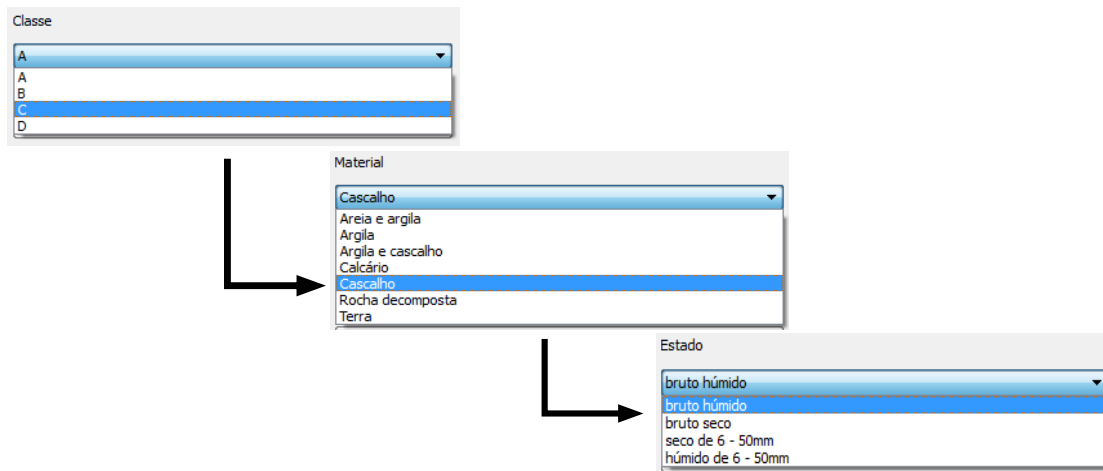


Figura 29: 2º Passo, sequência da seleção de um solo no EXCselector.

3º Passo (Definição das condições operacionais):

- A classificação das condições operacionais está pendente do passo anterior (2º passo), uma vez que esta classificação também depende do material de escavação.
 - *Input* – Opção da profundidade de escavação, condições de descarga, obstruções e rotação.
 - *Output* – Classificação das condições operacionais, E_G , t_{Ciclo} e produtividade (m^3/h) e custos unitários ($€/m^3$) relativos ao estado solto e natural do terreno.

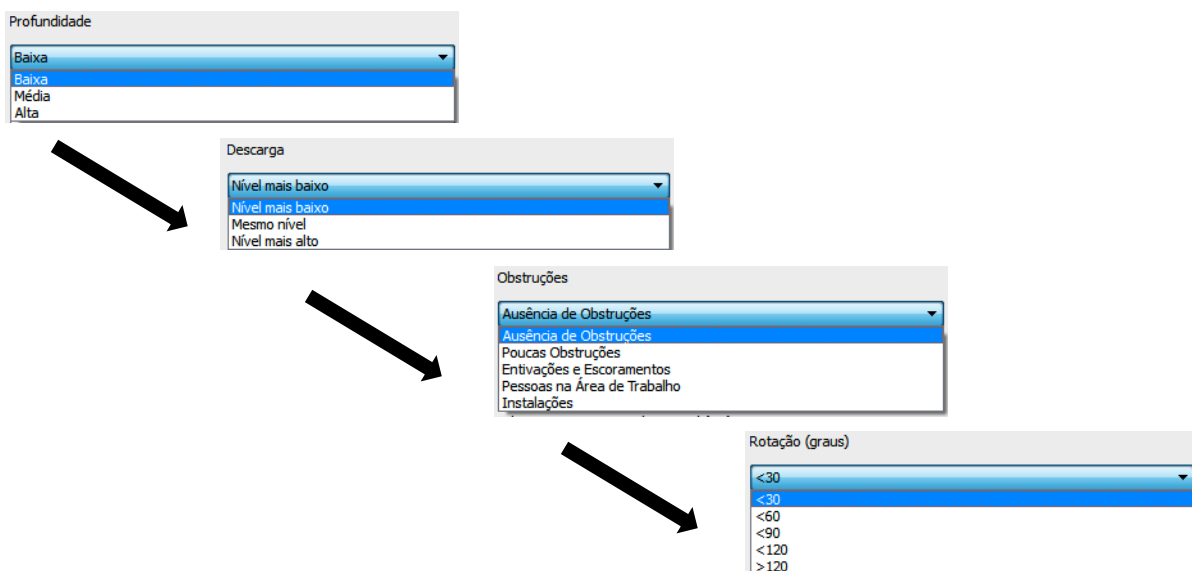


Figura 30: 3º Passo, EXCselector.

4º Passo (Definição do volume a escavar):

- *Input* – Introdução do volume de terras a escavar, em m³ e no estado natural.
- *Output* – Volume de terras no estado solto (m³), custo (€) e tempo (h) total da operação.

Quando as opções estiverem todas seleccionadas, ou quando forem alteradas, utiliza-se o comando “Calcular” para correr o programa e assim serem apresentados os resultados obtidos. Quando não for possível alterar uma seleção, ou quando se pretender reiniciar o *EXCselector* utiliza-se o comando “Limpar”.

7.3. Exemplo

Com recurso ao *EXCselector* fez-se a comparação entre dois equipamentos, das classes de vinte e duas e trinta toneladas (ver Quadro 23), e duas tarefas de escavação distintas (ver Quadro 24). Para o cálculo do custo horário empregou-se o método MVL (ver Quadro 23).

Quadro 23: Características e custo horário dos equipamentos.

	Equipamento 1	Equipamento 2
Peso operacional	22 000 kg	30 000 kg
Potência	115 kW	150 kW
Capacidade do balde	0,8 m ³	1,2 m ³
C_{PRP}	14,20 €/h	18,98 €/h
C_{OP}	28,70 €/h	36,74 €/h
C_{HT}	52,90 €/h	65,71 €/h

Quadro 24: Características das tarefas de escavação.

	Tarefa A	Tarefa B
Classe do Solo	D	B
Material de escavação	Areia e argila	Cascalho
Estado do material	Soltas	Bruto húmido
Profundidade	Média	Baixa
Descarga	Nível mais alto	Mesmo nível
Obstruções	Ausência	Poucas
Rotação	<120°	<90°
Volume natural	1000 m ³	500 m ³

O objetivo passa por atribuir a cada tarefa um equipamento, de modo que o resultado global, do conjunto das tarefas, seja o melhor. Para tal, assumiu-se que cada equipamento só estará associado a uma tarefa, as tarefas decorrem em simultâneo, a operação estará terminada quando as duas

tarefas estiverem concluídas e que as condições operacionais são independentes do equipamento escolhido (caso da profundidade).

Quadro 25: Resultados obtidos pelo EXCselector.

Equipamento	Tarefa A		Tarefa B	
	1	2	1	2
Massa Volúmica E. Solto	1600 kg/m ³		1930 kg/m ³	
Massa Volúmica E. Natural	2020 kg/m ³		2170 kg/m ³	
Empolamento	1,26		1.12	
Fator de Enchimento	105 %		70 %	
Condições Operacionais	V		IV	
Eficiência Global	58 %		67 %	
Tempo de Ciclo	24,8 s	27,0 s	21,5 s	23,4 s
Produtividade E. Solto	70,64 m ³ /h	97,62 m ³ /h	62,77 m ³ /h	86,74 m ³ /h
Produtividade E. Natural	56,06 m ³ /h	77,47 m ³ /h	56,04 m ³ /h	77,45 m ³ /h
Custo unitário E. Solto	0,75 €/m ³	0,67 €/m ³	0,84 €/m ³	0,76 €/m ³
Custo unitário E. Natural	0,94 €/m ³	0,85 €/m ³	0,94 €/m ³	0,85 €/m ³
Volume Solto	1260,0 m ³		560,0 m ³	
Custo Total	943,60 €	848,18 €	471,96 €	424,23 €
Tempo Total	17,8 h	12,9 h	8,9 h	6,5 h

Tendo em conta os dados obtidos no *EXCselector* e resumidos no Quadro 25 é possível tirar conclusões em relação à atribuição dos equipamentos às tarefas:

- **Hipótese I:** Atribuir à Tarefa A o Equipamento 1 e à Tarefa B o Equipamento 2. Correspondendo a um custo total, para a operação, de 1367,83 € e a 17,8 horas para a tarefa mais longa.
- **Hipótese II:** Atribuir à Tarefa A o Equipamento 2 e à Tarefa B o Equipamento 1. Correspondendo a um custo total, para a operação, de 1320,14 € e a 12,9 horas para a tarefa mais longa.

Através da análise das hipóteses é possível observar que a Hipótese II é a mais vantajosa tanto em termos de custos como em termos de tempo.

8. CONCLUSÃO

Ao longo do desenvolvimento deste trabalho tornou-se claro que tentar estabelecer um Sistema de Apoio à Decisão na Seleção de Equipamentos de Escavação, terá sempre que passar por um acompanhamento futuro e ajustamento do modelo adotado. A constante transformação e evolução dos equipamentos, mercados e normas vigentes conferem a qualquer modelo estático um carácter imediato e efêmero.

Outra questão, que pode ser levantada, é a opção por um modelo determinístico. Este tipo de modelo não permite avaliar a variabilidade dos tempos, das eficiências, da produtividade e dos custos ao longo do processo escavação. As abordagens de otimização apontam para a melhor configuração do sistema modelado, porém não propiciam necessariamente a solução ótima. Contudo, os resultados obtidos são essencialmente informativos e serão úteis como recurso à decisão.

Além disso, os serviços de escavação podem apresentar características muito específicas e particulares, por exemplo: escavação linear, abertura de valas e trincheiras; conservação e limpeza de cursos de água e taludes; demolição e manipulação de RCD; escavação com obstruções, redes de água, gás e/ou eletricidade. Assim, julga-se vantajoso verificar se os critérios definidos no modelo proposto são aplicáveis ou adaptáveis a obras que não se restrinjam à escavação comum.

A maior dificuldade encontrada ao longo do trabalho, foi a recetividade por parte dos representantes das marcas e a renitência em divulgar preços de entrega e de contratos de manutenção. Isto deve-se à grande concorrência que existe no setor e às margens de negociação, que podem variar muito, dependendo do cliente e do volume de negócio.

Pretende-se assim, com esta dissertação, fornecer uma ferramenta útil para o apoio à decisão na seleção de equipamentos de escavação, cálculo de custos e produtividade, capaz de suprir a necessidade de uma consulta de mercado.

Como desenvolvimento futuro poderá ser proveitoso desenvolver esta metodologia, não tendo apenas em conta um equipamento (escavadoras), mas sim os vários equipamentos que podem estar envolvidos em tarefas de movimentação de terras e terraplanagens. Se possível, desenvolver o *EXCselector*, como uma ferramenta informática de aplicação conjunta aos vários tipos de equipamentos.

Bibliografia

1. ISO 6165:2006 *Earth-moving machinery -- Basic types -- Identification and terms and definitions*. 2006.
2. **Ricardo, Hélio De Souza e Catalani, Guilherme.** *MANUAL PRÁTICO DE ESCAVAÇÃO - TERRAPLENAGEM E ESCAVAÇÃO DE ROCHA*. 3ª Edição. São Paulo : PINI, 2007.
3. **Barber Lloret, Pedro.** *Maquinaria de Obras Públicas II, Máquinas y Equipos, 4ª Edición*. San Vicente (Alicante) : Editorial Club Universitario, 2009.
4. **Especificação LNEC.** *E 286 Terminologia rodoviária. Equipamento de obra*. Lisboa : LNEC, 1973.
5. **Barber Lloret, Pedro.** *Maquinaria de Obras Públicas I, Introducción, Elementos Comunes de las Máquinas*. San Vicente (Alicante) : Editorial Club Universitario, 2008.
6. **Caterpillar.** *Catálogo 308D CR*. 2009.
7. **Hitachi Construction Machinery.** *Brochure - ZX210W-3*. Japan : s.n.
8. **Caterpillar.** *Catálogo - Escavadora Frontal 385C*. 2007.
9. **Komatsu.** *Catálogo PC350 LC/NLC-8*. 2008.
10. **Caterpillar.** *CATERPILLAR PERFORMANCE HANDBOOK 42*. Peoria, Illinois, U.S.A. : Caterpillar Inc., 2012.
11. **Komatsu.** *SPECIFICATIONS & APPLICATION HANDBOOK, Edition 30*. Japan : s.n., 2009.
12. **STET.** www.stet.pt. [Online] [Citação: 08 de Novembro de 2012.]
13. ISO 7135:2009 *Earth-moving machinery - Hydraulic excavators - Terminology and commercial specifications*. 2009.
14. ISO 6016:2008 *Earth-moving machinery - Methods of measuring the masses of whole machines, their equipment and components*. 2008.
15. ISO 9249:2007 *Earth-moving machinery - Engine test code - Net power*. 2007.
16. ISO 7451:2007 *Earth-moving machinery - Volumetric ratings for hoe-type and grab-type buckets of hydraulic excavators and backhoe loaders*. 2007.
17. **Caterpillar.** *Manual de Produção Caterpillar, Edição 37*. Peoria, E.U.A. : Caterpillar INC, 2007.
18. **SAE J296** *Excavator, Mini-excavator, and Backhoe Hoe Bucket Volumetric Rating*. 1999.
19. ISO 10567:2007 *Earth-moving machinery - Hydraulic excavators - Lift capacity*. 2007.

20. **Caterpillar**. *Brochure - 320D L Hydraulic Excavator*. 2007.
21. *ISO 6015:2006 Earth-moving machinery - Hydraulic excavators and backhoe loaders - Methods of determining tool forces*. 2006.
22. **Greco, Jisele Aparecida Santana**. *Terraplanagem (Notas de aulas)*. Belo Horizonte, Minas Gerais : Departamento de Engenharia de Transportes e Geotecnia, UFMG, 2012.
23. **Maranha das Neves, Emanuel**. *Mecânica dos solos e das rochas*. Lisboa : Secção de Folhas, Instituto Superior Técnico, 2006.
24. **Especificação LNEC**. *E 196 - Solos. Análise Granulométrica* . Lisboa : LNEC, 1966.
25. —. *E 239 – Solos. Análise granulométrica por peneiração húmida*. Lisboa : LNEC, 1970.
26. *Formulário de Mecânica dos Solos e das Rochas* . Lisboa : Instituto Superior Técnico , Ano Lectivo 2009-2010.
27. *NP 143 (Ed. 2). Solos. Determinação de limites de consistência*. 1969.
28. **Lima, Celso, Menezes, José Eduardo e Gomes, António Topa**. *Textos de apoio de Geologia de Engenharia*. Porto : FEUP, 2012.
29. **Guilherme, Pedro M. B.** *Escavação e movimento de terras. Regras de medição na construção. Modelo aplicável em Portugal*. Lisboa : Dissertação para o grau de mestre em Engenharia Civil, IST, Março de 2008.
30. **Fonseca, M. Santos**. *Curso sobre regras de medição na construção*. Lisboa : LNEC, Laboratório Nacional de Engenharia Civil , 2011.
31. **Ribeiro, Simão P. T.** *Terraplanagem. Metodologia e Técnicas de Compactação*. Porto : FEUP, 2008.
32. **Faria, José Amorim**. *Gestão de obras e segurança - 5 - Equipamentos de construção civil - Versão 8*. Porto : FEUP, Março de 2008.
33. *ESTIMATING CAPITAL AND OPERATIONAL COSTS OF BACKHOE SHOVELS*. **Sayadi, Ahmad Reza, et al., et al.** s.l. : Taylor & Francis, 2012, JOURNAL OF CIVIL ENGINEERING AND MANAGEMENT, Vols. 18(3): 378–385. 1822-3605.
34. **Volvo Construction Equipment**. *Volvo Excavator, Performance Manual*. Konz : s.n., 2008.
35. —. *Volvo Excavator, Attachments*. Konz : s.n., 2009.
36. **Moselhi, Osama e Alshibani, Adel**. *Crew optimization in planning and control of earthmoving operations using spatial technologies*. Montreal, Canada : B-C Björk, 2007.

37. **Volvo Construction Equipment.** images.volvoce.com. [Online] [Citação: 19 de 11 de 2012.]
38. **Alkass, S., El-Moslmani, K. e AlHusseini, M.** *A Computer Model for Selecting Equipment for Earthmoving Operations Using Queuing Theory.* Montreal, Canada : Department of Building, Civil and Environmental Engineering , 2003.
39. *Multiobjective Optimization of Earthmoving.* **Marzouk, Mohamed e Moselhi, Osama.** 2004, Journal of Construction Engineering and Management 130, 105 .
40. **Prata, Bruno de Athayde, Nobre Júnior, Ernesto Ferreira e Barroso, Giovanni Cordeiro.** *DIMENSIONAMENTO DE EQUIPES MECÂNICAS EM OBRAS DE TERRAPLENAGEM USANDO REDES DE PETRI COLORIDAS – Universidade Federal do Ceará – Mestrado em Logística e Pesquisa Operacional.* Fortaleza, Brasil : s.n., 2007.
41. **Hitachi Construction Machinery.** *Brochure, ZAXIS 200.* Japan : s.n.
42. **CASE Construction.** *Catálogo - Excavadoras hidráulicas CX C.* s.l. : MediaCross Firenze, 2012.

Anexo 1

Escavadora:

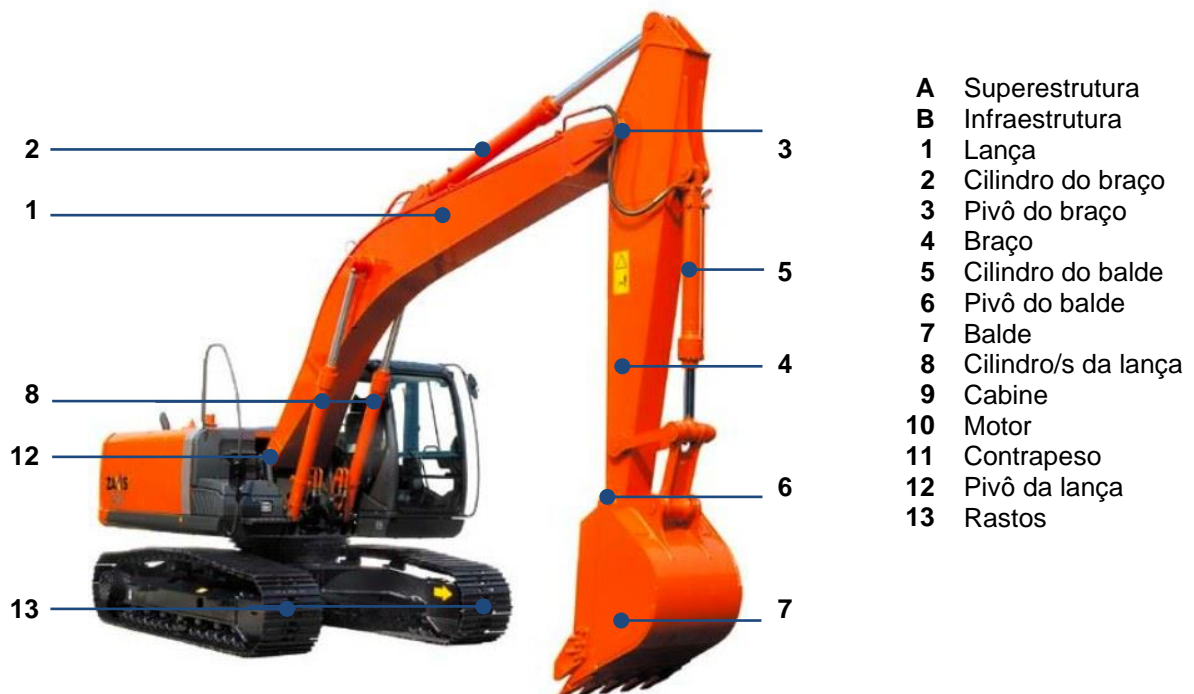
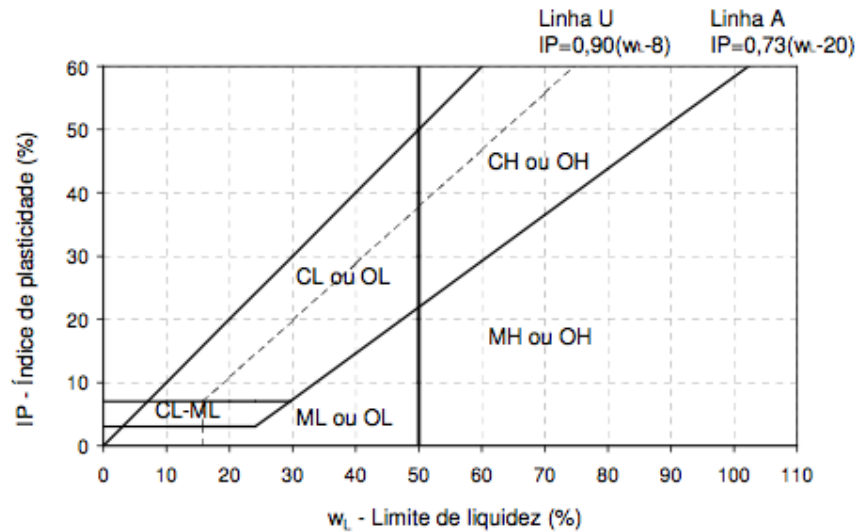


Figura A1- 1: Principais componentes de uma escavadora. ⁽⁴¹⁾

Anexo 2

Classificação Unificada de Solos – USCS



Quadro A2- 1: Carta de plasticidade. (26)

Solos Grossos % retida no #200 >50%	Composição	% finos < 5	C _c > 4 e 1 ≤ C _c ≤ 3	GW	% areia < 15% - cascalho bem graduado % areia ≥ 15% - cascalho bem graduado com areia	
						C _c ≤ 4 e/ou [C _c < 1 ou C _c > 3]
Cascalho % cascalho > % areia	5 ≤ % finos ≤ 12	C _c > 4 e 1 ≤ C _c ≤ 3 e finos ML ou MH	GW - GM	% areia < 15% - cascalho bem graduado com silte % areia ≥ 15% - cascalho bem graduado com silte e areia		
			GW - GC	finos CL ou CH: % areia < 15% - cascalho bem graduado com argila % areia ≥ 15% - cascalho bem graduado com argila e areia		
		C _c ≤ 4 e/ou [C _c < 1 ou C _c > 3] e finos ML ou MH	GP - GM	finos CL-ML: % areia < 15% - cascalho bem graduado com argila siltosa % areia ≥ 15% - cascalho bem graduado com argila siltosa e areia		
			GP - GC	finos CL ou CH: % areia < 15% - cascalho mal graduado com argila % areia ≥ 15% - cascalho mal graduado com argila e areia		
		% finos > 12	finos ML ou MH	GM	finos CL-ML: % areia < 15% - cascalho mal graduado com argila siltosa % areia ≥ 15% - cascalho mal graduado com argila siltosa e areia	
			finos CL ou CH	GC	finos CL ou CH: % areia < 15% - cascalho siltoso % areia ≥ 15% - cascalho siltoso com areia	
	Areia % areia ≥ % cascalho	5 ≤ % finos ≤ 12	C _c > 4 e 1 ≤ C _c ≤ 3	SW	% areia < 15% - cascalho argiloso % areia ≥ 15% - cascalho argiloso com areia	
				SP	% areia < 15% - cascalho argilo-siltoso % areia ≥ 15% - cascalho argilo-siltoso com areia	
			C _c ≤ 4 e/ou [C _c < 1 ou C _c > 3] e finos ML ou MH	SW - SM	% areia < 15% - cascalho bem graduado com cascalho % areia ≥ 15% - areia bem graduada com cascalho	
				SW - SC	finos CL ou CH: % cascalho < 15% - areia bem graduada com argila % cascalho ≥ 15% - areia bem graduada com argila e cascalho	
			C _c ≤ 4 e/ou [C _c < 1 ou C _c > 3] e finos ML ou MH	SP - SM	finos CL-ML: % cascalho < 15% - areia bem graduada com argila siltosa % cascalho ≥ 15% - areia bem graduada com argila siltosa e cascalho	
				SP - SC	finos CL ou CH: % cascalho < 15% - areia mal graduada com argila % cascalho ≥ 15% - areia mal graduada com argila e cascalho	
% finos > 12		finos CL ou CH	SC	finos CL-ML: % cascalho < 15% - areia mal graduada com argila siltosa % cascalho ≥ 15% - areia mal graduada com argila siltosa e cascalho		
		finos ML ou MH	SM	% cascalho < 15% - areia argilosa % cascalho ≥ 15% - areia argilosa com cascalho		
		finos CL-ML	SC - SM	% cascalho < 15% - areia siltosa % cascalho ≥ 15% - areia siltosa com cascalho		
						% cascalho < 15% - areia argilo-siltosa % cascalho ≥ 15% - areia argilo-siltosa com cascalho

Quadro A2- 2: USCS – Solos grosso. (26)

Solos Grossos % retida no #200 >50%	Cascalho % cascalho > % areia	%finos < 5	C _p >4 e 1≤C _s ≤ 3	GW	%areia<15% - cascalho bem graduado %areia≥15% - cascalho bem graduado com areia
			C _p ≤4 e/ou [C _s <1 ou C _s >3]	GP	%areia<15% - cascalho mal graduado %areia≥15% - cascalho mal graduado com areia
		5≤ %finos ≤ 12	C _p >4 e 1≤C _s ≤ 3 e finos ML ou MH	GW – GM	%areia<15% - cascalho bem graduado com silte %areia≥15% - cascalho bem graduado com silte e areia
				GW – GC	<i>finos CL ou CH:</i> %areia<15% - cascalho bem graduado com argila %areia≥15% - cascalho bem graduado com argila e areia <i>finos CL-ML:</i> %areia<15% - cascalho bem graduado com argila siltosa %areia≥15% - cascalho bem graduado com argila siltosa e areia
			C _p ≤4 e/ou [C _s <1 ou C _s >3] e finos ML ou MH	GP – GM	%areia<15% - cascalho mal graduado com silte %areia≥15% - cascalho mal graduado com silte e areia
			C _p ≤4 e/ou [C _s <1 ou C _s >3] e finos CL ou CH ou CL-ML	GP – GC	<i>finos CL ou CH:</i> %areia<15% - cascalho mal graduado com argila %areia≥15% - cascalho mal graduado com argila e areia <i>finos CL-ML:</i> %areia<15% - cascalho mal graduado com argila siltosa %areia≥15% - cascalho mal graduado com argila siltosa e areia
		%finos > 12	finos ML ou MH	GM	%areia<15% - cascalho siltoso %areia≥15% - cascalho siltoso com areia
			finos CL ou CH	GC	%areia<15% - cascalho argiloso %areia≥15% - cascalho argiloso com areia
			finos CL-ML	GC – GM	%areia<15% - cascalho argilo-siltoso %areia≥15% - cascalho argilo-siltoso com areia
		Areia % areia ≥ % cascalho	%finos < 5	C _p >4 e 1≤C _s ≤ 3	SW
	C _p ≤4 e/ou [C _s <1 ou C _s >3]			SP	%cascalho<15% - areia mal graduada %cascalho≥15% - areia mal graduada com cascalho
	5≤ %finos ≤ 12		C _p >4 e 1≤C _s ≤ 3 e finos ML ou MH	SW – SM	%cascalho<15% - areia bem graduada com silte %cascalho≥15% - areia bem graduada com silte e cascalho
				SW – SC	<i>finos CL ou CH:</i> %cascalho<15% - areia bem graduada com argila %cascalho≥15% - areia bem graduada com argila e cascalho <i>finos CL-ML:</i> %cascalho<15% - areia bem graduada com argila siltosa %cascalho≥15% - areia bem graduada com argila siltosa e cascalho
			C _p ≤4 e/ou [C _s <1 ou C _s >3] e finos ML ou MH	SP – SM	%cascalho<15% - areia mal graduada com silte %cascalho≥15% - areia mal graduada com silte e cascalho
			C _p ≤4 e/ou [C _s <1 ou C _s >3] e finos CL ou CH ou CL-ML	SP – SC	<i>finos CL ou CH:</i> %cascalho<15% - areia mal graduada com argila %cascalho≥15% - areia mal graduada com argila e cascalho <i>finos CL-ML:</i> %cascalho<15% - areia mal graduada com argila siltosa %cascalho≥15% - areia mal graduada com argila siltosa e cascalho
	%finos > 12		finos CL ou CH	SC	%cascalho <15% - areia argilosa %cascalho≥15% - areia argilosa com cascalho
			finos ML ou MH	SM	%cascalho<15% - areia siltosa %cascalho≥15% - areia siltosa com cascalho
			finos CL-ML	SC – SM	%cascalho <15% - areia argilo-siltosa %cascalho≥15% - areia argilo-siltosa com cascalho

Quadro A2- 1: USCS – Solos finos. (26)

Sísmica de refração

Material		v_p (m/s)
Ar		330
Água	liquida	1400 – 1500
	gelo	3000 – 4000
Solos	normais	250 – 460
	consolidados	460 – 600
Areias	seca	250 – 1200
	saturada	1200 – 1900
Terra e cascalho	soltos	450 – 1100
	consolidados	1200 – 2100
Argilas		1000 – 2100
Margas		1800 – 3500
Arenito		1400 – 4500
Conglomerados		1200 – 7000
Cálcario		1500 – 6000
Granito	são	3000 – 6000
	meteorizado	1200 – 1600
Bassalto	são	5500 – 6300
	fracturado	2500 – 3000

Quadro A2- 4: Valores típicos de de V_p para diversos materiais. ⁽³⁾

Massa específica e empolamento

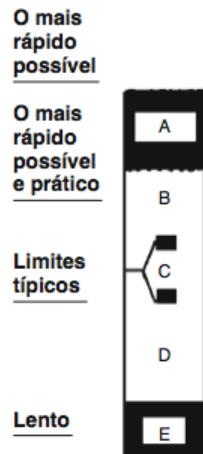
Materiais			Solto kg/m ³	Natural kg/m ³	Empolamento E
Areia	seca, solta		1420	1600	1,13
	húmida		1690	1900	1,12
	saturada		1840	2080	1,13
Areia e argila	soltas		1600	2020	1,26
	compactas		2400	2400	1,00
Arenito			1510	2520	1,67
Argila	leito natural		1660	2020	1,22
	seca		1480	1840	1,24
	húmida		1660	2080	1,25
Argila e cascalho	secos		1420	1660	1,17
	húmidos		1540	1840	1,19
Basalto			1960	2970	1,52
Calcário	fragmentado		1540	2610	1,69
	britado		1540	1540	1,00
Cascalho	bruto		1930	2170	1,12
	seco		1510	1690	1,12
	seco	de 6 - 50mm	1690	1900	1,12
	húmido	de 6 - 50mm	2020	2260	1,12
Granito	Fragmentado		1660	2730	1,64
Marga			1250	1540	1,23
Rocha decomposta	75% rocha	25% terra	1960	2790	1,42
	50% rocha	50% terra	1720	2280	1,33
	25% rocha	75% terra	1570	1960	1,25
Terra	seca	compacta	1510	1900	1,26
	húmida	escavada	1600	2020	1,26
	orgânica		950	1370	1,44
Xisto			1250	1660	1,33

Quadro A2- 5: Valores típicos de empolamento e massa volúmica de diversos materiais no estado natural e solto. ⁽²²⁾

Anexo 3

Tempos de ciclo.

Manual Caterpillar:



Quadro A3- 1: Limites de t_{Ciclo} .⁽¹⁷⁾

CYCLETIME ESTIMATING CHART															
CYCLETIME	MACHINE SIZE CLASS														CYCLETIME
	307C 308D CR 308D CR SB	311D	M313D 312D	M315D 315D L	M318D 319D L 319D LN	M322D 320D 320D RR 321D CR 323D	324D	328D LCR	329D	336D	345D	365C L	385C		
10 SEC.								N/A							0.17 min.
15								N/A							0.25 min.
20 SEC.								N/A							0.33 min.
25															0.42 min.
30 SEC.															0.50 min.
35															0.58 min.
40 SEC.															0.67 min.
45															0.75 min.
50 SEC.															0.83 min.
55															0.92 min.
60 SEC.															1.0 min.

Quadro A3- 2: Limites de t_{Ciclo} para vários modelos~.⁽¹⁰⁾

Manual Komatsu:

Model	Range	Swing angle		Model	Range	Swing angle	
		45° ~ 90°	90° ~ 180°			45° ~ 90°	90° ~ 180°
PC78		10 ~ 13	13 ~ 16	PC270, PC290		15 ~ 18	18 ~ 21
PW140		11 ~ 14	14 ~ 17	PC300, PC350		15 ~ 18	18 ~ 21
PC130		11 ~ 14	14 ~ 17	PC400, PC450		16 ~ 19	19 ~ 22
PC160		13 ~ 16	16 ~ 19	PC600		17 ~ 20	20 ~ 23
PW160, PW180		13 ~ 16	16 ~ 19	PC750, PC800, PC850		18 ~ 21	21 ~ 24
PC180		13 ~ 16	16 ~ 19	PC1250		22 ~ 25	25 ~ 28
PC200, PC210		13 ~ 16	16 ~ 19	PC2000		24 ~ 27	27 ~ 30
PW200, 220		14 ~ 17	17 ~ 20				
PC220, PC230, PC240		14 ~ 17	17 ~ 20				

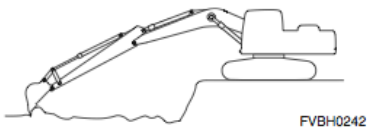

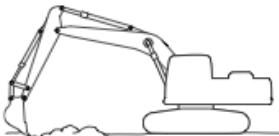

Quadro A3- 3: Valores de t_{Ciclo} (em segundos) para vários modelos. ⁽¹¹⁾

Condições de carregamento (% da profundidade máxima da escavadora)	Condições de descarga			
	Fácil	Normal	Média a difícil	Difícil
	Descarga em pilha	Alvo grande	Alvo pequeno	Alvo pequeno e máximo alcance de despejo
<40%	0,7	0,9	1,1	1,4
40% ~ 75%	0,8	1	1,3	1,6
>75%	0,9	1,1	1,5	1,8

Quadro A3- 4: Fatores para diversas condições de carregamento e descarregamento. ⁽¹¹⁾

Anexo 4

Seleção de lança, braço e balde:

Tipo de trabalho		Combinação		
	Exemplo	Lança	Braço	Balde
Maior amplitude 	<ul style="list-style-type: none"> -Escavações Profundas -Dragagens -Descarga mais longe/alta 	Longa	Longo	Pequena capacidade
Maior produção 	<ul style="list-style-type: none"> -Escavação de solos compactos -Descarga em pilha ou camião 	Curta	Curto	Grande capacidade
Maior força de ataque e maior capacidade de levantamento 	<ul style="list-style-type: none"> -Elevação de cargas pesadas -Escavação em terrenos muito compactos e terrenos rochosos (<75%) 	-	Curto	Estreito e reforçado
Trabalho mais pesado 	<ul style="list-style-type: none"> -Escavação em terrenos rochosos (>75%) -Desmonte de rocha 	Curta e reforçada	Corto e reforçado	Para trabalhos pesados

Quadro A4- 1: Tipos de trabalhos e combinações de lança, braço e baldes. ⁽¹¹⁾

Seleção de baldes:

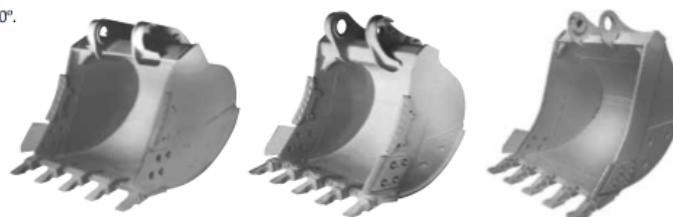
CX220 - CAÇAMBAS - para configuração da lança de 5.650 mm

CAÇAMBA	Capacidade SAE (m³)	Largura (mm)	Peso (kg)	Número de dentes	Máxima densidade do material t/m³		
					Braços de Escavação		
					2.400 mm	2.940 mm	3.500 mm
GP	0,8	1.000	615	5	4,08	3,69	3,35
GP	1,0	1.200	725	5	3,08	2,77	2,51
GP	1,1	1.300	780	6	2,75	2,46	2,23
GP	1,3	1.500	890	7	2,22	1,98	1,79
HD	0,8	1.000	1.060	4	3,51	3,12	2,78
HD	1,0	1.200	1.160	5	2,64	2,33	2,07
HD	1,1	1.300	1.235	5	2,33	2,05	1,81
HD	1,3	1.500	1.320	6	1,89	1,66	1,46
GPN	1,1	1.100	735	5	2,79	2,50	2,27
GPN	1,3	1.200	785	5	2,41	2,16	1,96
GPN	1,5	1.300	850	5	2,03	1,82	1,64
HDN	1,1	1.100	1.080	4	2,47	2,19	1,95
HDN	1,3	1.200	1.260	5	2,03	1,78	1,58
HDN	1,5	1.300	1.360	5	1,68	1,47	1,29
GPT	0,4	2.400 / 400	466	-	3,2	3,0	2,8
GPC	1,1	1.730	790	-	2,74	2,45	2,22


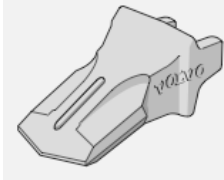
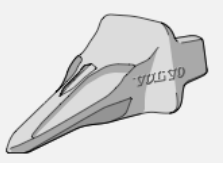
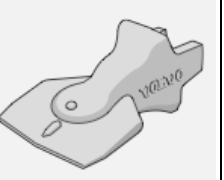

Legenda das tabelas acima:

Caçamba SAE, 100% coroadada, máximo alcance, giro de trabalho de 360°.

- GP : Uso Geral - terra e agregados finos (Boca Larga)
- GPN : Uso Geral - terra e agregados finos (Boca Estreita)
- HD : Uso Severo - cascalhos, rocha e minério (Boca Larga)
- HDN : Uso Severo - cascalhos, rocha e minério (Boca Estreita)
- GPT : Uso Geral - valeta trapezoidal
- GPC : Uso Geral - limpeza de rios e áreas alagadas



Quadro A4- 2: Características de baldes e combinação com lanças e densidades de materiais de uma máquina real. ⁽⁴²⁾

				
GPE Para fins gerais	AMRE Alta resistência	PPE Máxima penetração	SNE Aterro/acabamentos	TPE Solo compacto

Quadro A4- 3: Exemplos de dentes para baldes de escavação. ⁽³⁵⁾