

O POTENCIAL DO DYNAMO COMO FERRAMENTA LOW-CODE NA MELHORIA E OPTIMIZAÇÃO DE PROCESSOS EM PROJETOS DE ESTRUTURAS

Francisco Conde ⁽¹⁾

(1) MOQ Consulting Lda, Porto

Resumo

A crescente adoção da metodologia Building Information Modeling (BIM) tem conduzido a um aumento significativo do nível de detalhe e da quantidade de informação integrada nos modelos de projeto. No âmbito específico do projeto de estruturas, a modelação e pormenorização de armaduras assume um papel crítico, sendo ambas frequentemente associadas a processos manuais repetitivos e morosos, bem como na tarefa da extração fiável de quantidades para efeitos de medições, de controlo de qualidade e otimização.

O presente artigo propõe uma abordagem baseada na automatização de processos através da plataforma de programação visual Dynamo for Revit, procurando demonstrar a sua viabilidade na inserção automática de armaduras em elementos de diferentes tipologias estruturais.

Com base nos dados extraídos do modelo BIM, são realizadas análises comparativas que recorrem a métricas, como p. ex., o índice de preponderância, evidenciando o potencial da abordagem proposta como ferramenta de apoio à otimização estrutural. Os resultados obtidos num caso de estudo real demonstram ganhos relevantes ao nível do controlo de qualidade e da fiabilidade da informação, reforçando o papel da automatização como elemento-chave no desenvolvimento do projeto.

1. Introdução

No contexto dos projetos de estruturas, a crescente utilização da metodologia BIM traduz-se num aumento substancial da complexidade dos modelos, em particular no que respeita à modelação e pormenorização de armaduras. A necessidade de representar de forma rigorosa a geometria das armaduras, associada à correta definição dos seus parâmetros e à extração fiável de quantidades, torna a inserção manual destes elementos uma tarefa morosa, repetitiva e altamente suscetível a erros. Este cenário é agravado em projetos de maior dimensão, onde a consistência de critérios e a uniformização de soluções assumem uma importância crítica.

Paralelamente, a crescente utilização do modelo BIM como fonte primária de dados para medições, orçamentação e análises comparativas coloca uma pressão adicional sobre a fiabilidade da informação nele contida. A obtenção de quantidades globais de aço e a sua análise por tipologia estrutural constituem um dado relevante, não só para efeitos de medição, como também, no suporte de decisões de otimização estrutural, económica e ambiental.

No entanto, apesar das ferramentas nativas de modelação de armaduras em *Revit* terem melhorado substancialmente nos últimos anos, surgiu internamente a necessidade de automatizar este processo de modo a viabilizar a geração ágil de armaduras, com o menor número de *inputs* possível, garantindo a uniformização das mesmas no processo produtivo da empresa. A automatização de tarefas repetitivas surge assim como uma resposta natural a estes desafios, permitindo uma maior fluidez na produção do projeto, otimizando tempo que possa ser aplicado em problemas com um maior potencial de aumento de valor acrescentado no produto final.

Estas ferramentas são frequentemente associadas ao desenvolvimento de soluções baseadas em linguagens de programação mais avançadas, exigindo um nível de especialização que constitui muitas vezes uma barreira à sua adoção generalizada. A programação visual low-code não substitui estas abordagens nem responde a todos os cenários de automatização, no entanto, plataformas como o Dynamo for Revit permitem implementar um conjunto relevante de processos automatizados de forma acessível. Adicionalmente, a sua abordagem gráfica facilita a compreensão gradual dos mecanismos de interação com o modelo BIM e da lógica associada à API do *Revit*, podendo servir como base para desenvolvimentos mais avançados no futuro.

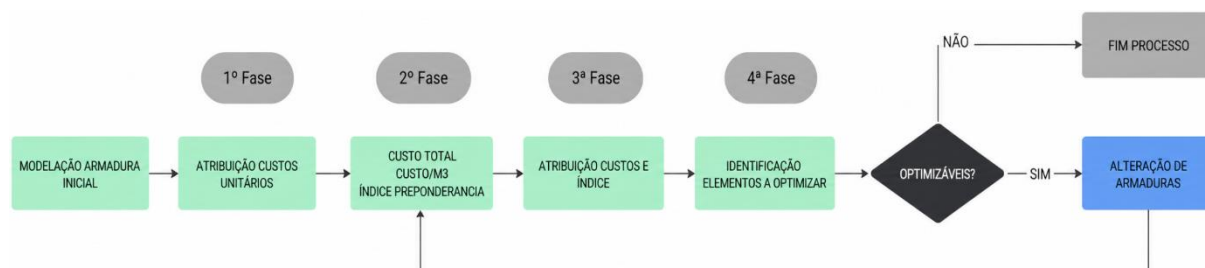


Figura 1: Fluxograma Geral

Pretende-se assim demonstrar o potencial do Dynamo na automatização da inserção de armaduras em diferentes tipologias estruturais — nomeadamente pilares, sapatas de fundação, muros de suporte e lajes — bem como nos benefícios de introduzir estes dados no modelo. Realça-se que neste momento, ainda não existe nenhuma interface que integre o dimensionamento orgânico das seções com a inserção de armaduras, apesar de se considerar como um desenvolvimento futuro.

2. Automatização de armaduras

Independentemente da tipologia do elemento que se pretenda inserir armaduras, será sempre necessária a seleção do elemento modelado para a obtenção dos dados geométricos, tal como as dimensões da seção transversal, comprimento ou extensão e o recobrimento do mesmo. Esta informação é um pré-requisito, pelo que a execução do procedimento automático passa pela leitura destes dados como condição inicial, seguido dos *inputs* do utilizador em termos de diâmetros e espaçamentos de armadura que dependerão do dimensionamento estrutural.

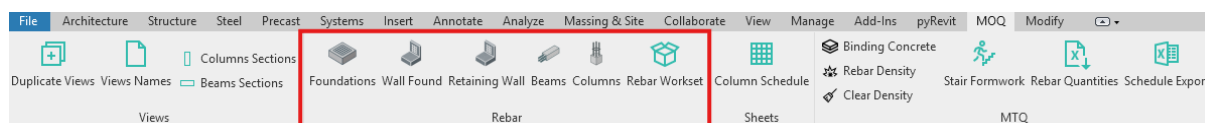


Figura 2: Aplicativos gerais inserção de armaduras

Para simplificar a execução dos scripts criados em *Dynamo*, estes foram integrados no *Revit* através de botões personalizados gerados com o auxílio do *pyRevit*, permitindo a ativação direta sem recorrer ao *Dynamo Player*.

2.1 Armaduras em vigas

Modelação de armaduras longitudinais superiores e inferiores, tal como as armaduras de esforço transversal com subdivisão das zonas críticas para que seja possível ao utilizador ajustar em conformidade. Como dados de entrada, são requeridos os diâmetros e quantidade de varões longitudinais em cada face e o diâmetro e espaçamento da armadura transversal.

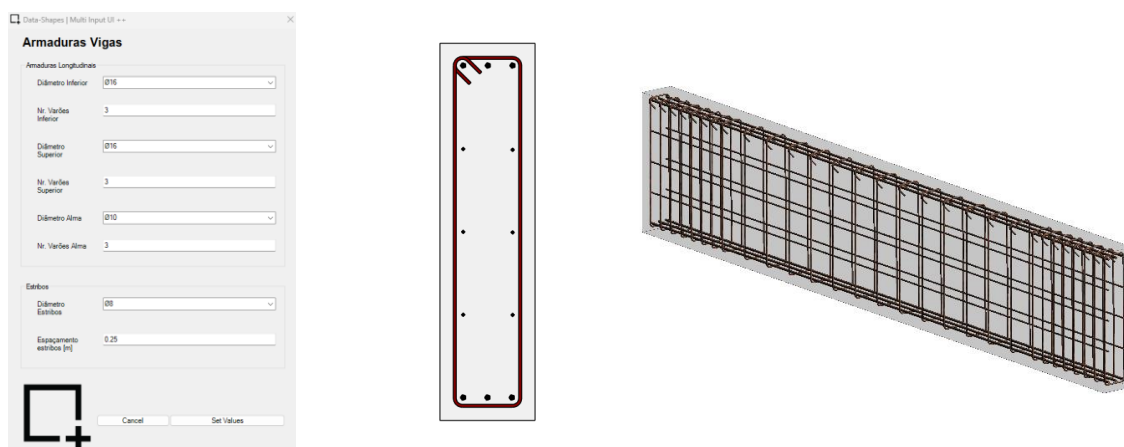


Figura 3: Inputs para vigas e armaduras geradas

2.2 Armaduras em pilares

Permite a criação de armaduras longitudinais individualizadas, armaduras transversais (estribos) na zona corrente/zona de reforços e garante as regras de cintagem das armaduras longitudinais dando como prioridade a cintagem próxima das extremidades. Como dados de entrada, são requeridos os diâmetros e quantidade de varões longitudinais em cada face e o diâmetro e espaçamento da armadura transversal.

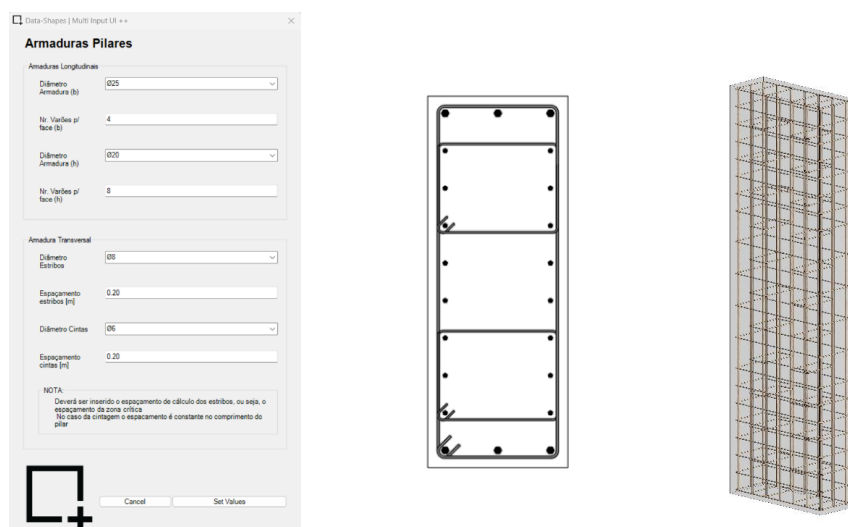


Figura 4: Inputs para pilares e armaduras geradas

2.3 Armaduras em muros de suporte

Modelação de armaduras verticais e horizontais, com a possibilidade de inserção de cadências de armaduras mistas, isto é, inclui a possibilidade de se introduzir dois diâmetros e espaçamentos distintos por face.

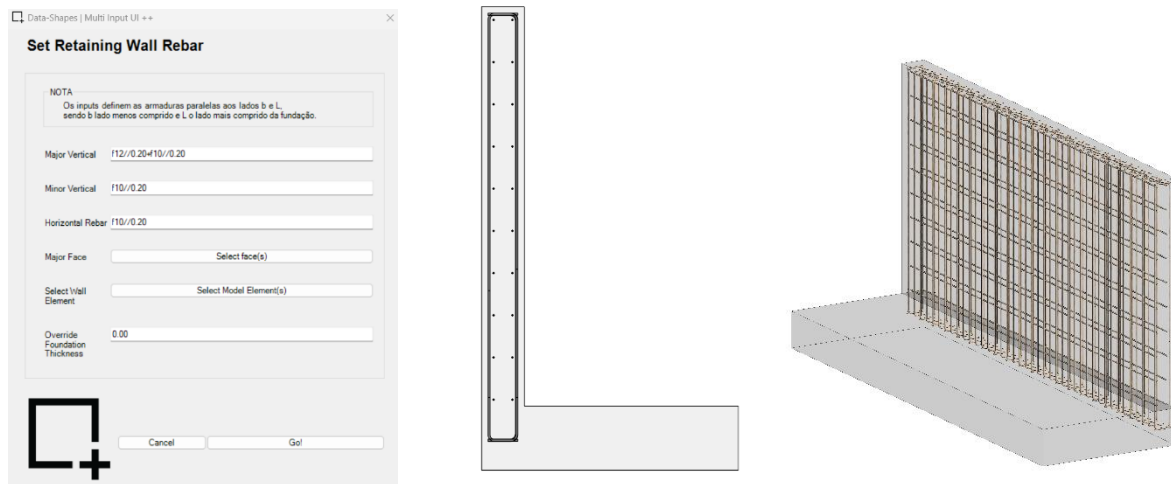


Figura 5: *Inputs* para muros de suporte e armaduras geradas

2.4 Armaduras em fundações

Modelação de armaduras superiores e inferiores, com a possibilidade de inserção de cadências de armaduras mistas, isto é, inclui a possibilidade de se introduzir dois diâmetros e espaçamentos distintos por face.

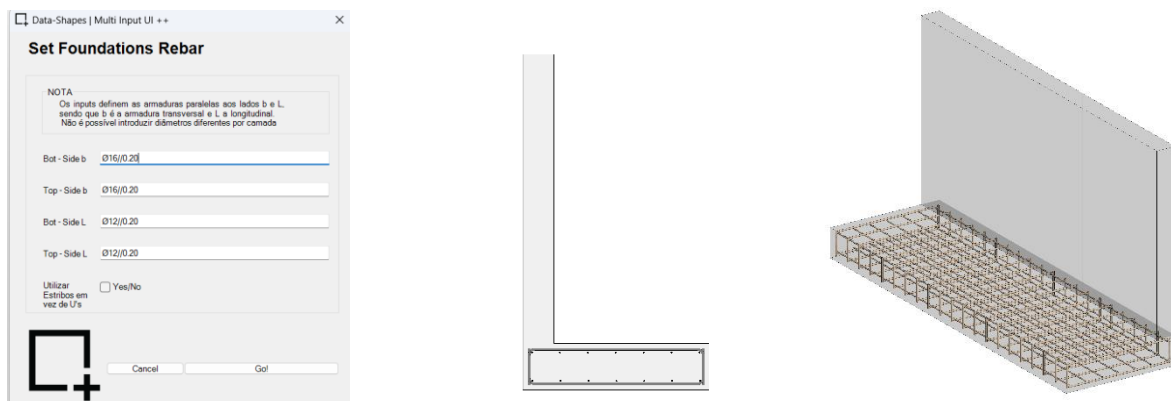


Figura 6: *Inputs* para sapatas de muros e armaduras geradas

3. Análise comparativa de tempos de execução

Com o objetivo de avaliar o impacto ao nível da produtividade, procedeu-se a uma análise comparativa dos tempos de execução associados à modelação manual e à aplicação dos procedimentos automatizados. Os tempos considerados referem-se exclusivamente à execução da modelação da armadura a partir do seu início, não incluindo fases prévias de configuração

do modelo ou ajustes pontuais posteriores, de forma a garantir a coerência dos resultados obtidos (Tabela 1).

Tabela 1: Tempos de execução

	Manual [s]	Automatizado [s]	Diferencial [%]
Vigas	128	24	87%
Pilares	180	27	85%
Muro de Suporte	195	27	86%
Fundação Muro	66	24	63%

Os valores apresentados correspondem a medições realizadas no contexto do exemplos apresentados, apenas para um elemento de cada tipologia e devem ser interpretados como indicativos dos ganhos obtidos, podendo variar em função da complexidade do projeto e da experiência do utilizador.

4. Processamento de custos

O processo de quantificação e orçamentação no Revit está associado a uma lógica de custos por material ou por tipo de elemento. Na primeira, assume-se que todos os elementos têm um material associado e que o mesmo tem um preço por unidade de medida. Por exemplo, uma parede de enchimento composta por um pano de alvenaria de tijolo e gesso cartonado pode ser modelada de forma segmentada, com a atribuição de um custo à alvenaria e outro para a placa de gesso. Medem-se ambos individualmente e obtém-se o custo total de uma parede em específico bastando, para o efeito, somar o custo total dos seus componentes.

Outra forma de obter o mesmo valor consiste em calcular previamente o custo de cada tipo de parede e associá-lo ao respetivo tipo, resultando em custos distintos para paredes com composições diferentes.

Ambas as metodologias promovem a adoção de uma lógica de fabricação em que cada elemento tem as suas propriedades geométricas e custos associados.

No caso específico dos elementos de betão, foi adotada uma metodologia híbrida de cálculo de custos. Esta opção decorre da necessidade de considerar, pelo menos, três variáveis fundamentais: o volume de betão, a área de cofragem e o peso das armaduras. Atendendo a que, em contexto de projeto, a cofragem não é, na maioria dos casos, explicitamente modelada, e que a extração direta do peso do aço por elemento apresenta limitações, tornou-se necessário recorrer ao pós-processamento das quantidades parciais de forma a garantir uma determinação fiável do custo total.

Com a definição das armaduras nos elementos e, tendo em consideração que a cubicagem de betão e áreas de cofragem foram previamente incorporadas no modelo, temos todos os dados necessários para processar as quantidades e custos totais.

4.1 Custos globais

Com a utilização do *Global Cost* realiza-se o pós-processamento final dividindo-se em 2 fases distintas.

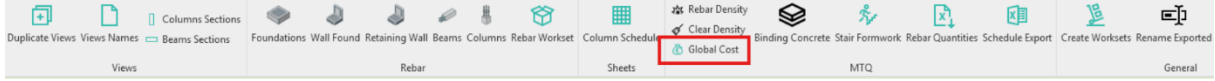


Figura 7: Aplicativo para pós processamento de custos e quantidades

A primeira passa pela aplicação dos custos unitários do betão C_1 [€/m³], cofragem C_2 [€/m²] e armaduras C_3 [€/kg] aos elementos. De seguida, determina o custo total por metro cúbico e o índice de preponderância de cada elemento, este último referente à categoria analisada, através das seguintes fórmulas:

$$C_{(m3)} = \frac{C_{elem}}{V_{b(i)}} \quad (1)$$

sendo:

$$C_{(elem)} = C_1 V_b + C_2 A_c + C_3 P_a \quad (2)$$

$C_{(m3)}$	custo por m ³ [€/m ³]
$C_{(elem)}$	custo total do elemento [€]
V_b	volume de betão [m ³]
A_c	área de cofragem [m ²]
P_a	peso da armadura [kg]

e, em paralelo,

$$I_{(i)} = (k_1 * w_{V,i}) + (k_2 * w_{A,i}) \quad (3)$$

sendo:

$$w_{V,i} = \frac{V_{b(i)}}{\sum_{i=1}^n V_{b,i}} \quad (4)$$

$$w_{A,i} = \frac{P_{a,i}}{\sum_{i=1}^n P_{a,i}} \quad (5)$$

$w_{V,i}$	peso relativo atribuído ao volume de betão
$w_{A,i}$	peso relativo atribuído à quantidade de armaduras
k_1	fator de importância betão
k_2	fator de importância armaduras

Tipicamente despreza-se a contribuição da cofragem no índice $I_{(i)}$, por se considerar que não é um ponto passível de ser otimizado e, consideramos que os fatores de importância assumem valores igualitários. Estes últimos podem ser ajustados consoante a flutuação de preços de mercado no fornecimento de betão e armaduras, calibrando assim o índice para situações mais específicas. Os valores do índice variam entre 0 e 1 (ou 0% e 100%) traduzindo o peso de um elemento específico na totalidade dos elementos analisados.

Ambos os resultados são atribuídos a parâmetros dedicados que serão utilizados posteriormente (Figura 8).

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
GENERAL PARAMETERS								REBAR PARAMETERS		COST PARAMETERS					
Mark	Qty.	Type	B [m]	H [m]	L [m]	Volume [m³]	Formwork [m²]	(1) Density [kg/m³]	Rebar Weight [kg]	Elem. Cost [€]	Cost per m3 [€/m³]	MTQ Contribution [%]	Concrete Cost [€/m³]	Formwork Cost [€/m²]	Rebar Cost [€/kg]
P1	1	P-45x120	0.45	1.20	5.80	3.13	19.14	122.24	382.86	1,486.04€	474.47€	25%	120.00€	30.00€	1.40€
P1	1	P-45x120	0.45	1.20	5.80	3.13	19.14	122.24	382.86	1,486.04€	474.47€	25%	120.00€	30.00€	1.40€
P1	1	P-45x120	0.45	1.20	5.80	3.13	19.14	122.24	382.86	1,486.04€	474.47€	25%	120.00€	30.00€	1.40€
P1	1	P-45x120	0.45	1.20	5.80	3.13	19.14	122.24	382.86	1,486.04€	474.47€	25%	120.00€	30.00€	1.40€
Total:	4					12.53	76.56		1531.42	5,944.15€		100%			

Figura 8: Exemplificação dos custos finais, índice de preponderância e custos unitários

5. Aplicação no caso de estudo

Partindo de um modelo interno em fase de projeto de execução, aplicamos os procedimentos descritos nos capítulos anteriores para a categoria dos pilares. O projeto contabiliza 43 pilares cujas designações de P1 a P43, representam o agrupamento por secção e por piso.

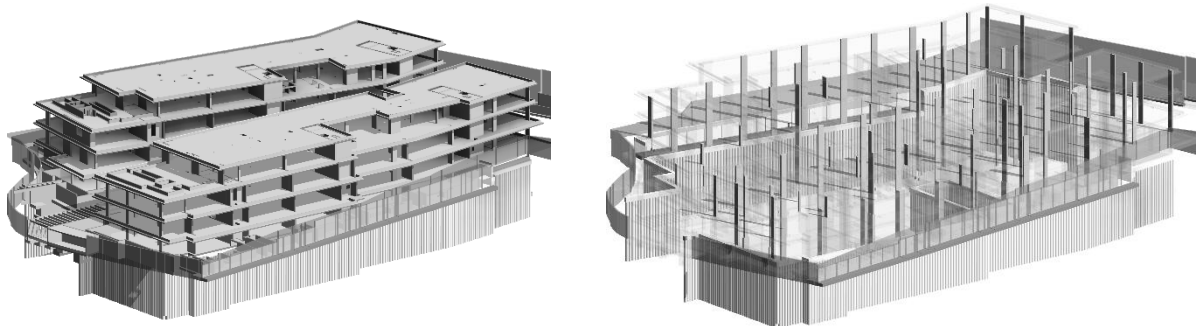


Figura 9: Imagens 3D do caso de estudo

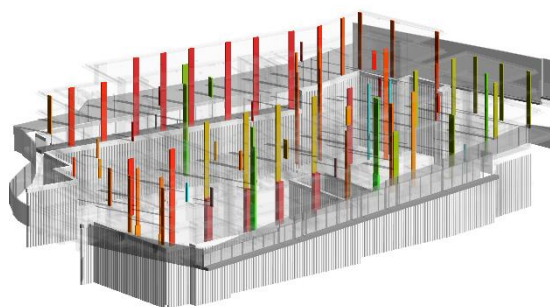
Na Figura 10, a título exemplificativo, pelo tamanho considerável da quantidade de dados, apresenta-se os resultados para alguns pilares aleatórios.

A	B	C	D	E	F	G	H	I	J	K	L	M	N	O	P
GENERAL PARAMETERS						REBAR PARAMETERS			COST PARAMETERS						
Mark	Qty.	Type	B [m]	H [m]	L [m]	Volume [m³]	Formwork [m²]	(1) Density [kg/m³]	Rebar Weight [kg]	Elem. Cost [€]	Cost per m3 [€/m³]	MTQ Contribution [%]	Concrete Cost [€/m³]	Formwork Cost [€/m²]	Rebar Cost [€/kg]
P4	6	P-25x100	0.25	1.00	<vari	4.98	49.75	256.84	1277.78	3,878.39€	<varies>	40.93%	120.00€	30.00€	1.40€
P14	1	P-30x110	0.30	1.10	3.22	1.06	9.02	96.77	102.83	541.95€	510.02€	5.56%	120.00€	30.00€	1.40€
P24	1	P-30x100	0.30	1.00	2.98	0.68	7.74	350.82	239.43	649.16€	951.15€	6.80%	120.00€	30.00€	1.40€
P34	3	P-25x40	0.25	0.40	<vari	0.96	12.51	189.17	181.98	745.39€	774.84€	6.69%	120.00€	30.00€	1.40€
P40	1	P-30x85	0.30	0.85	3.22	0.82	7.41	155.04	127.30	498.94€	607.65€	5.19%	120.00€	30.00€	1.40€
P41	1	P-Ø40			3.22	0.40	4.05	143.16	57.93	251.04€	620.43€	2.46%	120.00€	30.00€	1.40€
P42	1	P-30x40	0.30	0.40	3.22	0.39	4.51	156.09	60.31	266.05€	688.54€	2.47%	120.00€	30.00€	1.40€
P43	4	P-25x100	0.25	1.00	<vari	3.21	32.05	316.15	1013.26	2,764.67€	862.61€	29.91%	120.00€	30.00€	1.40€
Total:	18					12.50	127.02		3060.83	9,595.58€		100.00%			

Figura 10: Exemplo de dados calculados

Com o objetivo de identificar elementos que apresentam um custo divergente, procedeu-se à análise comparativa de custo por m3 que nos permite identificar potenciais erros, sejam eles de cálculo ou modelação, pela identificação de custos por metro cúbico que apresentem discrepâncias muito consideráveis e que mereçam especial atenção.

Esta análise pode ser realizada através das tabelas do Revit, mediante a simples ordenação dos valores dos parâmetros, ou por meio da visualização gráfica dos elementos, recorrendo ao automatismo interno *ColorByParameter*. Este último recolhe os valores de um parâmetro definido pelo utilizador e aplica uma escala cromática logarítmica aos elementos, variando entre verde (valor mínimo) e vermelho (valor máximo), sendo o valor máximo destacado a azul-claro, de forma a permitir uma identificação rápida (Figura 11).

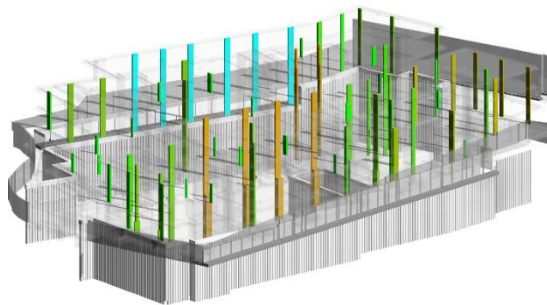


Mark	Qty.	Volume [m³]	Formwork [m²]	Rebar Weight [kg]	Elem. Cost [€]	Cost per m3 [€/m³]	MTQ Contribution [%]
P37	1	0.24	3.52	81.13	247.80€	1033.25€	0.22%
P32	1	0.32	4.19	106.58	315.59€	996.72€	0.30%
P32	7	2.24	29.15	768.83	2,219.79€	990.09€	2.11%
P30	1	0.28	3.65	92.16	272.05€	970.74€	0.26%
P30	1	0.27	3.46	87.64	258.81€	970.39€	0.24%
P24	1	0.68	7.74	239.43	649.16€	951.15€	0.65%
P36	1	0.32	4.69	80.14	291.30€	910.31€	0.25%
P36	2	0.64	8.96	160.28	569.99€	890.63€	0.50%
P13	2	0.81	9.66	224.06	700.09€	869.60€	0.66%
P43	4	3.21	32.05	1013.26	2,764.67€	862.61€	2.86%
P5	11	8.80	88.00	2682.44	7,423.42€	843.50€	7.64%
P5	13	10.96	109.55	3314.44	9,241.31€	843.50€	9.52%
P23	1	0.80	8.03	232.46	661.97€	831.36€	0.68%
P11	3	0.96	13.44	196.97	794.19€	827.25€	0.67%
P15	1	0.48	5.47	114.05	381.84€	790.56€	0.36%
P28	3	2.40	24.00	634.94	1,896.92€	790.39€	1.92%
P6	3	2.41	24.05	630.81	1,893.23€	787.20€	1.92%
P4	4	3.20	32.00	821.89	2,494.64€	779.56€	2.52%
P4	2	1.78	17.75	455.89	1,383.79€	779.57€	1.40%
P27	4	3.56	35.56	993.36	2,755.33€	775.60€	2.78%
P27	1	0.75	7.46	189.56	579.81€	775.62€	0.58%
P34	3	0.96	12.51	181.98	745.39€	774.84€	0.64%
P38	1	0.39	4.51	82.07	297.40€	754.16€	0.27%
P9	1	0.40	4.80	76.71	299.39€	748.49€	0.27%

Figura 11: Amostra de resultados de custos por metro cúbico de betão

Os pilares P37 e P32 destacam-se como os elementos que apresentam o maior custo por metro cúbico de betão. Importa salientar que esta análise é realizada individualmente para cada tramo de pilar, não sendo considerado qualquer agrupamento por designação de pilar.

Numa segunda abordagem, procede-se à identificação do pilar com o índice de preponderância mais elevado, o qual traduz o maior potencial de otimização no contexto global dos pilares (Figura 12).



Mark	Qty.	Volume [m³]	Formwork [m²]	Rebar Weight [kg]	Elem. Cost [€]	Cost per m³ [€/m³]	MTQ Contribution [%]
P1	6	7.28	56.24	761.13	3,626.63€	3,007.87€	3.75%
P2	12	9.20	81.69	2,198.26	6,632.33€	8640.10€	6.95%
P3	6	3.29	35.68	671.33	2,404.71€	4,390.19€	2.28%
P4	6	4.98	49.75	1,277.78	3,878.39€	4,677.46€	3.91%
P5	24	19.76	197.55	5,976.88	16,664.73€	20,245.79€	17.15%
P6	3	2.41	24.05	630.81	1,893.23€	2,861.60€	1.92%
P7	9	5.05	54.83	999.70	3,650.65€	6,505.39€	3.44%
P8	1	0.48	5.12	66.84	394.92€	635.25€	0.28%
P9	1	0.40	4.80	76.71	299.39€	748.48€	0.27%
P10	1	0.44	4.74	66.74	287.74€	681.17€	0.26%
P11	3	0.96	13.44	196.97	794.16€	2,481.75€	0.67%
P12	2	1.80	18.00	294.85	1,042.79€	1,303.48€	1.00%
P13	2	0.81	9.66	224.06	700.09€	1,739.32€	0.66%
P14	1	1.06	9.02	102.83	541.95€	510.02€	0.53%
P15	1	0.48	5.47	114.05	381.84€	790.56€	0.36%
P16	3	1.68	18.28	335.49	1,220.04€	2,174.12€	1.15%
P17	6	7.09	54.96	607.72	3,350.24€	2,865.06€	3.41%
P18	6	7.48	57.53	593.22	3,453.99€	2,786.54€	3.52%
P19	6	3.66	35.68	616.00	2,372.31€	3,886.80€	2.30%
P20	5	2.80	28.01	597.55	2,012.01€	3,593.48€	1.99%
P21	10	9.34	80.91	1,088.95	5,072.21€	5,432.90€	5.01%
P22	6	5.29	41.46	370.15	2,396.44€	2,788.35€	2.40%
P23	1	0.80	8.03	232.46	661.97€	831.36€	0.68%
P24	1	0.68	7.74	239.43	649.16€	951.15€	0.65%
P25	8	5.25	50.08	1,013.83	3,551.40€	5,444.02€	3.54%

Figura 12: Amostra de resultados do índice de preponderância

Os resultados evidenciam o pilar P5 como o elemento mais representativo na amostra global de pilares, sendo este o prioritário numa eventual otimização, conforme ilustrado no gráfico que sintetiza os índices de preponderância por designação.

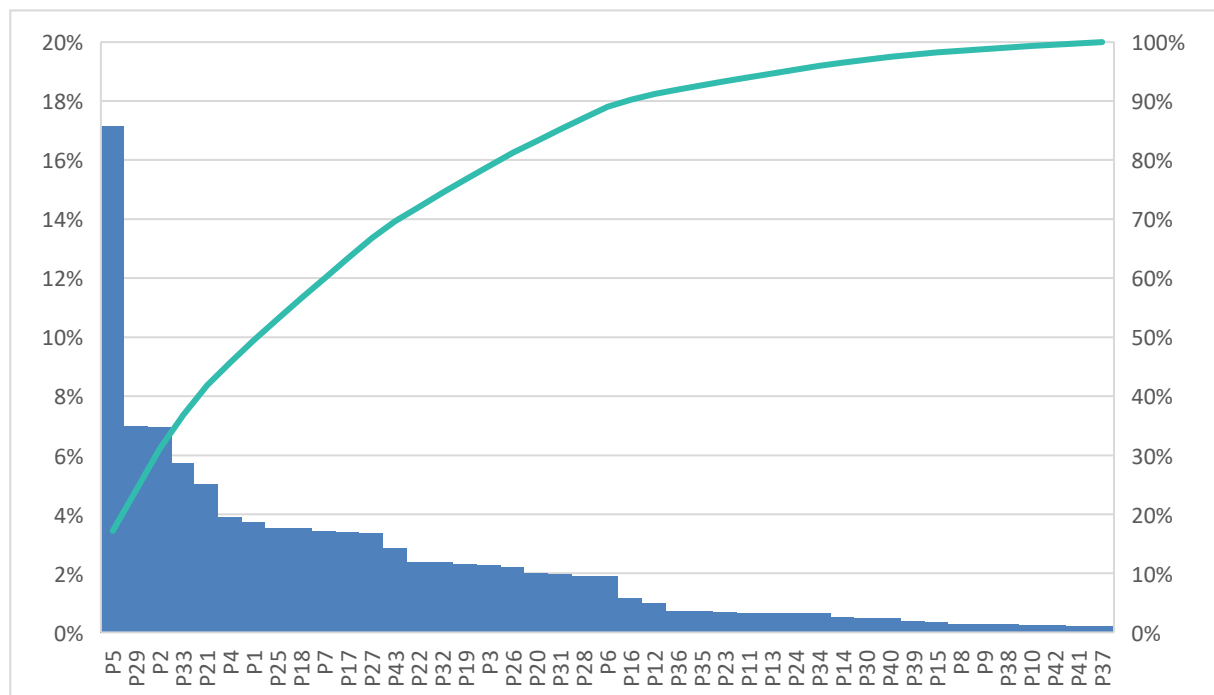


Gráfico 1: Gráfico de Pareto – Índices de Preponderância

Este processo pode ser repetido sequencialmente, bastando para o efeito, ocultar na vista ativa os elementos que não se desejam analisar e/ou filtrar os mesmos da tabela.

No caso de estudo optou-se por analisar os pilares, contudo, este processo pode ser executado para qualquer tipo de categoria estrutural cujos elementos englobem armaduras modeladas.

6. Conclusão

O presente artigo visa demonstrar a adequabilidade da plataforma *Dynamo* como base para a automatização de processos internos na produção de projetos de estruturas. Os procedimentos desenvolvidos evidenciam que a inserção de armaduras é viável e eficiente conforme demonstrado pela análise comparativa de tempos de execução.

Adicionalmente garante a consistência e uniformização na modelação, independente do utilizador, promovendo fiabilidade nos resultados obtidos.

A integração desta variável no conjunto dos elementos do projeto possibilita o acesso a novas dimensões de análise com um esforço adicional reduzido, nomeadamente ao nível da avaliação de métricas, controlo de qualidade, validações, exportação de quantidades e estimativas orçamentais, dispensando a realização de medições detalhadas ou levantamentos manuais exaustivos, que ficam desta forma automatizados.

Referências

- [1] D. T. Doan, M. G. Khalil, and S. Kim, "A rule-based approach for automated rebar detailing in BIM models," *Automation in Construction*, vol. 120, 103388, Dec. 2020. doi: 10.1016/j.job.2024.111604.
- [2] T. Fudala, *Structural Design Package for Dynamo*. Disponível em: <https://dynamopackages.com>
- [3] K. Sobon, *Orchid Package for Dynamo*. Disponível em: <https://dynamopackages.com>
- [4] Autodesk Data-Shaping Team, *Data-Shapes for Dynamo*, GitHub repository. Available: <https://github.com/Autodesk-DataShaping/Data-Shapes>