

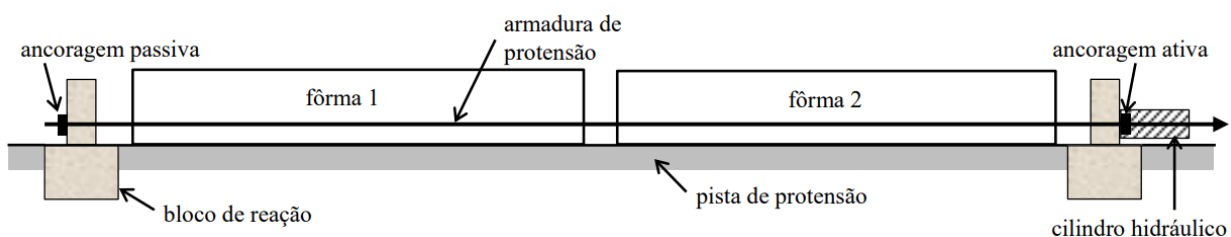
(I) INTRODUÇÃO

Uma indústria de pré-fabricados em concreto dispõe de uma pista de protensão para fabricação seriada de vigas pré-moldadas pelo método da **pré-tensão**, ilustrado nas imagens abaixo. Os procedimentos principais são descritos a seguir:



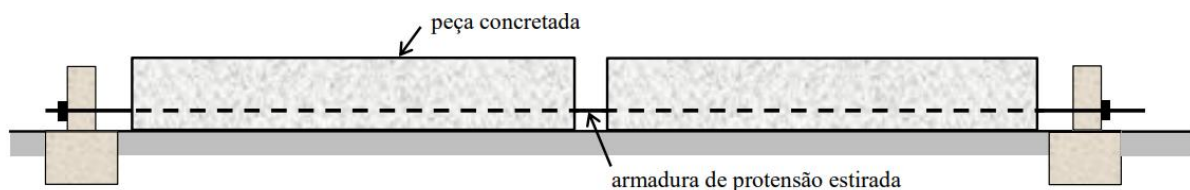
Fonte: Adaptado de Bastos (2025).

- 1) Em uma data inicial, um conjunto de n fôrmas de aço é posicionado na pista de protensão, a qual tem capacidade para acomodar, simultaneamente, no máximo 10 fôrmas (para protensão simultânea de 10 vigas).
- 2) A armadura de protensão é fixada em uma extremidade (ancoragem passiva indicada na figura abaixo, com $n = 2$) e aloca no interior de fôrmas de aço, na posição de projeto. Na outra extremidade (ancoragem ativa), a armadura é alongada por um cilindro hidráulico apoiado na estrutura de reação. A seguir, o cilindro hidráulico é retirado.



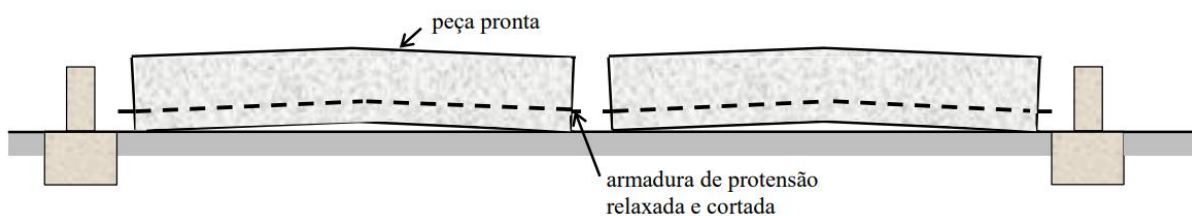
Fonte: Adaptado de Bastos (2025).

- 3) Com a armadura estirada e fixada nas ancoragens da pista de protensão, o concreto é lançado na fôrma, aderindo-se à armadura, conforme apresentado na figura a seguir.



Fonte: Adaptado de Bastos (2025).

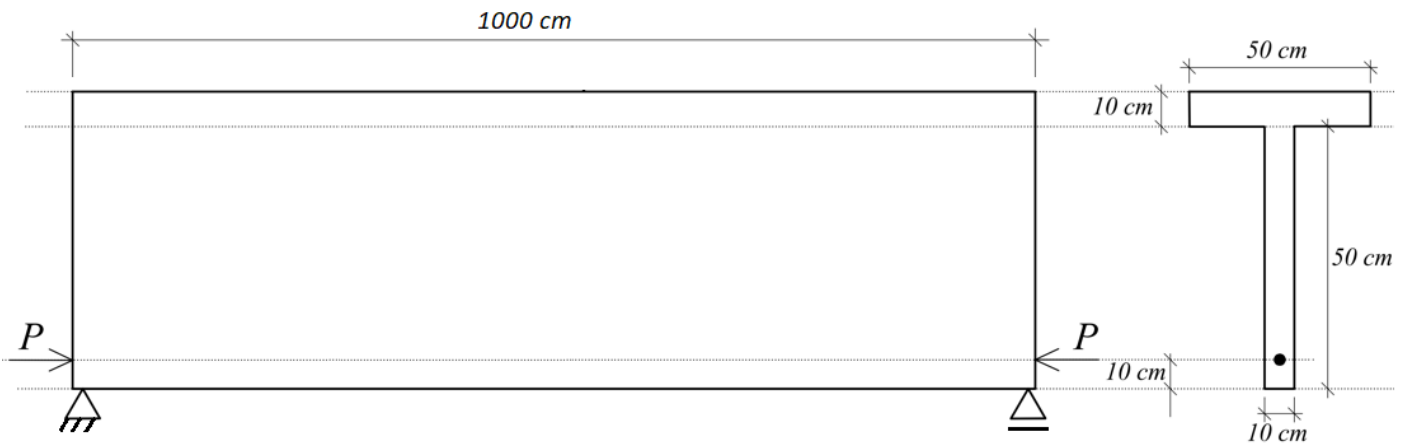
- 4) Após um período de tempo ΔT necessário para o concreto adquirir o nível de resistência suficiente para evitar falha, a armadura de protensão é cortada das ancoragens e a força de protensão é transferida para o concreto (a armadura tende a voltar à condição indeformada, mas é restringida pelo concreto endurecido, comprimindo parcialmente ou totalmente a seção transversal da peça). A seguir, as fôrmas são imediatamente desmontadas.



Fonte: Adaptado de Bastos (2025).

(II) DESCRIÇÃO DO PROJETO

A indústria precisará planejar o desenvolvimento de serviços de produção de vigas protendidas para seis clientes, com dimensões indicadas abaixo, minimizando os custos de produção e garantindo a qualidade do produto final. A armadura protendida ficará a 10 cm do bordo inferior da viga e será submetida a uma força de protensão efetiva $P = 284$ kN.



A indústria dispõe de uma carta de traços para produção do concreto das vigas. A tabela apresenta uma relação entre a resistência à compressão característica do concreto (f_{ck}) em função do tempo (t), obtida a partir de ensaios experimentais de corpos de prova do material, ensaiados em idades de 1 a 28 dias.

Concreto	Relação água/aglomerante	Constituição	Resistência à compressão característica do concreto (f_{ck}) em função do tempo (t)
Traço 1	0,45	Cimento CPV + 5% sílica ativa	$f_{ck} = 0,9277.t + 28,349$
Traço 2	0,45	Cimento CPV	$f_{ck} = 7,7236.\log_e(t) + 21,680$
Traço 3	0,55	Cimento CPV + 5% sílica ativa	$f_{ck} = 0,6872.t + 27,929$
Traço 4	0,55	Cimento CPV	$f_{ck} = 0,6980.t + 27,185$

Fonte: Adaptado de Romano (2009).

As relações apresentadas na carta de traços podem ser utilizadas para estimar a resistência à tração média do concreto ($f_{ct,m}$) ao longo do tempo, aplicando-se a seguinte formulação proposta pela ABNT NBR 6118 (2014):

$$f_{ct,m} = 0,3 f_{ck}^{2/3}$$

Considere o início do horizonte de planejamento como o dia 0. A empresa deverá entregar cada serviço em uma janela $[D_{inicial}, D_{final}]$ de tempo combinada com cada cliente. Se o serviço for finalizado antes do dia $D_{inicial}$, haverá um custo C_a (em R\$/dia de antecipação) de manutenção de estoque na indústria. Se o serviço for finalizado após o dia D_{final} , haverá um custo C_b (em R\$/dia de atraso) por conta do atraso. A lista de serviços é apresentada na tabela a seguir:

Serviço	Lote a ser entregue	$D_{inicial}$	D_{final}	C_a	C_b
Cliente A	10 vigas protendidas com o concreto "Traço 3"	9	13	100	1000
Cliente B	10 vigas protendidas com o concreto "Traço 4"	12	18	150	1500
Cliente C	10 vigas protendidas com o concreto "Traço 3"	9	12	100	1000
Cliente D	10 vigas protendidas com o concreto "Traço 2"	15	21	200	2000
Cliente E	10 vigas protendidas com o concreto "Traço 1"	20	26	300	3000
Cliente F	10 vigas protendidas com o concreto "Traço 2"	12	16	250	2500

Uma vez iniciado o processo de protensão na pista, ele obrigatoriamente deverá ser finalizado (não é possível interromper o procedimento). Qualquer um dos seis serviços pode ser iniciado no dia 0. Quando um serviço j é executado imediatamente após um serviço i , é necessário um tempo T_{ij} para montagem da pista de protensão. Esse tempo depende

das diferenças entre um conjunto de exigências específicas de cada cliente, e é representado (em dias) na tabela a seguir. Considere também que a pista de protensão está completamente pronta na data zero, ou seja, será nulo o tempo de preparação da pista para realização do primeiro serviço escolhido. Além disso, será permitida, quando necessária, a inclusão de tempo ocioso entre a execução de dois serviços consecutivos.

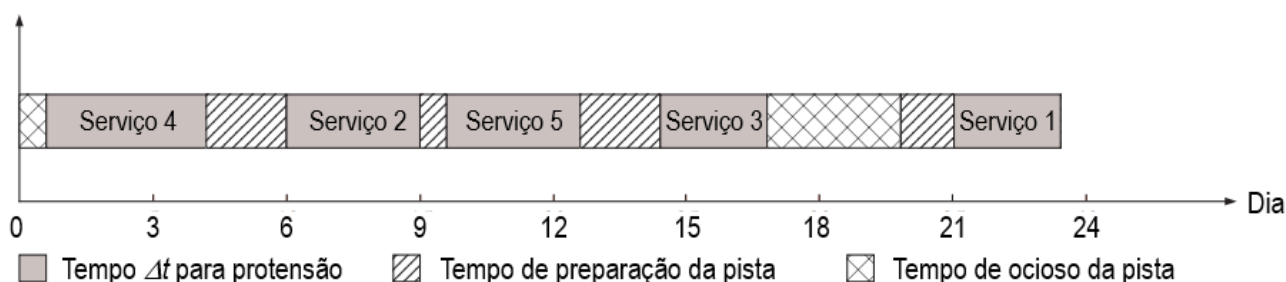
	Cliente A	Cliente B	Cliente C	Cliente D	Cliente E	Cliente F
Cliente A	0	1	1	2	4	3
Cliente B	1	0	3	2	1	2
Cliente C	1	3	0	2	4	3
Cliente D	2	2	2	0	2	2
Cliente E	4	1	4	2	0	5
Cliente F	3	2	3	2	5	0

(III) OBJETIVO DO TRABALHO

Minimizar o somatório dos custos de antecipação e de atraso de produção das vigas de concreto protendidas para os clientes da indústria de pré-fabricados.

(IV) TAREFAS

- Calcular, para cada um dos serviços, o tempo ΔT requerido para evitar a ruptura do concreto das vigas durante os procedimentos de protensão, considerando um coeficiente de segurança de 1,30.
- Aplicar uma metodologia para minimização da soma dos custos de antecipação e de atraso de produção das vigas, na qual os valores de ΔT calculados sejam parâmetros de entrada.
- Apresentar o Diagrama de Gantt referente à solução encontrada, com seu respectivo valor de custo minimizado. Um exemplo hipotético de Diagrama de Gantt para um conjunto de 5 serviços é apresentado abaixo:



(V) RELATÓRIO

- Cada grupo deverá preparar um relatório contendo:
 - o memorial de cálculo e a solução dos itens (a), (b), e (c);
 - contextualização e justificativa para as soluções propostas;
 - descrição detalhada dos métodos, de modo a permitir a reprodutibilidade da obtenção dos resultados;
 - lista das referências citadas ao longo do relatório, no padrão ABNT.
- Cada grupo deve indicar um(a) responsável pelo envio do relatório, em arquivo de formato PDF com nome *GrupoX_Relatorio.pdf* (X é o número de identificação do grupo), para um dos seguintes e-mails:
 - alexandre.cury@uff.br
 - gustavo.nalon@uff.br
- Data limite para entrega do relatório: 17h do dia 06/07/2026.

(VI) APRESENTAÇÃO

- Cada grupo deverá preparar uma apresentação técnica, com duração de 10 a 15 minutos, cujos slides mostrem:
 - uma breve descrição do projeto;
 - descrição detalhada da solução proposta para os itens (a), (b) e (c);
 - uma breve descrição das estratégias utilizadas pela equipe para encontrar as soluções propostas.

- A apresentação técnica acontecerá em aula, na data do limite de entrega do relatório. Desta aula deverão participar apenas os alunos do curso de Engenharia de Produção. Todos os integrantes dos grupos deverão participar da apresentação do trabalho.
- O trabalho será avaliado por uma banca de professores composta pelos professores responsáveis pela disciplina e um professor convidado do Depto. de Engenharia de Produção.
- Cada grupo deve indicar um(a) responsável pelo envio dos slides empregados na apresentação, em arquivo de formato PDF com nome *GrupoX_Apresentacao.pdf* (X é o número de identificação do grupo), para um dos seguintes e-mails:
 - alexandre.cury@ufff.br
 - gustavo.nalon@ufff.br
- Data limite para entrega da apresentação: 17h do dia 08/07/2026.

(VII) CRITÉRIOS DE AVALIAÇÃO

- No **relatório** serão avaliados: (i) validade da solução; (ii) criatividade da solução; (iii) detalhamento da metodologia utilizada; (iv) clareza e organização do texto.
- Na **apresentação** serão avaliados: (i) domínio do tema; (ii) didática nas explicações da solução; (iii) cumprimento do tempo definido para apresentação; (iv) clareza e organização dos slides.

OBSERVAÇÕES
<ul style="list-style-type: none"> • Como esta não é uma atividade com solução rigidamente definida, serão aceitas propostas de soluções com diferentes níveis de dificuldade. Considerando que a validade e a criatividade da solução é um dos critérios de avaliação, recomenda-se que os grupos proponham soluções desafiadoras e tecnicamente bem fundamentadas. • Em havendo qualquer suspeita de plágio e/ou uso de modelos LLM para geração do relatório, os participantes terão as suas notas zeradas.

(VIII) REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 6118: Projeto de estruturas de concreto – Procedimento**. Rio de Janeiro: ABNT, 2014.
- BASTOS, Paulo Sérgio dos Santos. **Fundamentos do Concreto Protendido**. Bauru: Universidade Estadual Paulista (UNESP), 2025.
- ROMANO, Fátima Sequeira. **Estudo do ingresso de cloretos em concretos localizados no litoral norte do Rio Grande do Sul**. 2009. Dissertação (Mestrado em Engenharia Civil) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2009.