

LE VIADUC DE VILA POUCA DE AGUIAR

Imed BEN FREDJ, Michel GUÉRINET, Claude SERVANT

Eiffage

Alain LACROIX

Spie Batignolles

Armando RITO

RITO LDA

Jean-Marc TANIS

EGIS JMI

1. PRÉSENTATION GÉNÉRALE DU PROJET

Le viaduc de Vila Pouca de Aguiar est construit dans le cadre d'une concession à péage attribuée en décembre 2000 par l'Etat portugais à un groupement concessionnaire constitué à 50% de filiales d'Eiffage.

Ce viaduc n'était pas prévu au programme initial de l'autoroute IP3 (ou A24) située dans le nord du Portugal qui est totalement ouverte à la circulation depuis juin 2007. Il s'inscrit dans le cadre de la construction du tronçon E1 de cette autoroute de 157,50 km de longueur dont le nom est Scut Interior Norte.

Financée d'une manière originale, IP3-Scut Interior Norte consiste en la construction et l'exploitation sur une durée de trente ans d'une autoroute qui fonctionne selon le principe du péage « virtuel », d'où la présence dans le nom du projet, du sigle Scut qui signifie « Sem custos para o utilizador » (sans coût pour l'utilisateur).

Le péage n'est donc pas acquitté par les usagers mais les montants sont directement reversés par l'Etat portugais au concessionnaire. Dans la pratique, les tronçons autoroutiers sont équipés de capteurs de mesure automatique du trafic, le nombre d'essieux étant décompté automatiquement au moyen de boucles magnétiques noyées dans la chaussée, les données enregistrées sont transmises au ministère des Transports portugais qui paie alors le péage au concessionnaire.

Orientée Nord-Sud, l'autoroute IP3 est une autoroute à deux fois deux voies qui reliera la frontière espagnole à Viseu, au Sud-Est de Porto. Elle permet ainsi de désenclaver et de développer les régions montagneuses peu peuplées qu'elle traverse.

Interceptant une zone classée « Natura 2000 » où une meute de loups avait élu domicile, le tracé initial de l'autoroute a dû être modifié et basculé d'un côté à l'autre de la vallée. Cette opération, loin d'être anodine, a nécessité la construction d'un viaduc de 1348 mètres de longueur, situé à quelques centaines de mètres au sud du village de Vila Pouca de Aguiar. L'ouvrage permet le franchissement de la RN2 et de la vallée au-dessus du rio Corgo.

Comme son prédécesseur, le pont du Corgo situé sur le tronçon C à proximité de la ville de Regua, à 80 km à l'est de Porto, le viaduc de Vila Pouca de Aguiar constitue l'exemple type d'un ouvrage international.

En effet, il a été conçu à l'origine suivant un avant-projet sommaire français, construit selon un « projecto de execução », portugais et réalisé par un groupement d'entreprises franco-portugaises Spie-Batignolles, société française bien implantée au Portugal et l'entreprise portugaise Construtora doTamega sous maîtrise d'œuvre NORINTER.

L'ouvrage, constitué de deux tabliers parallèles entièrement en béton, de 1348m de long chacun, a été construit dans des délais record de vingt deux mois.

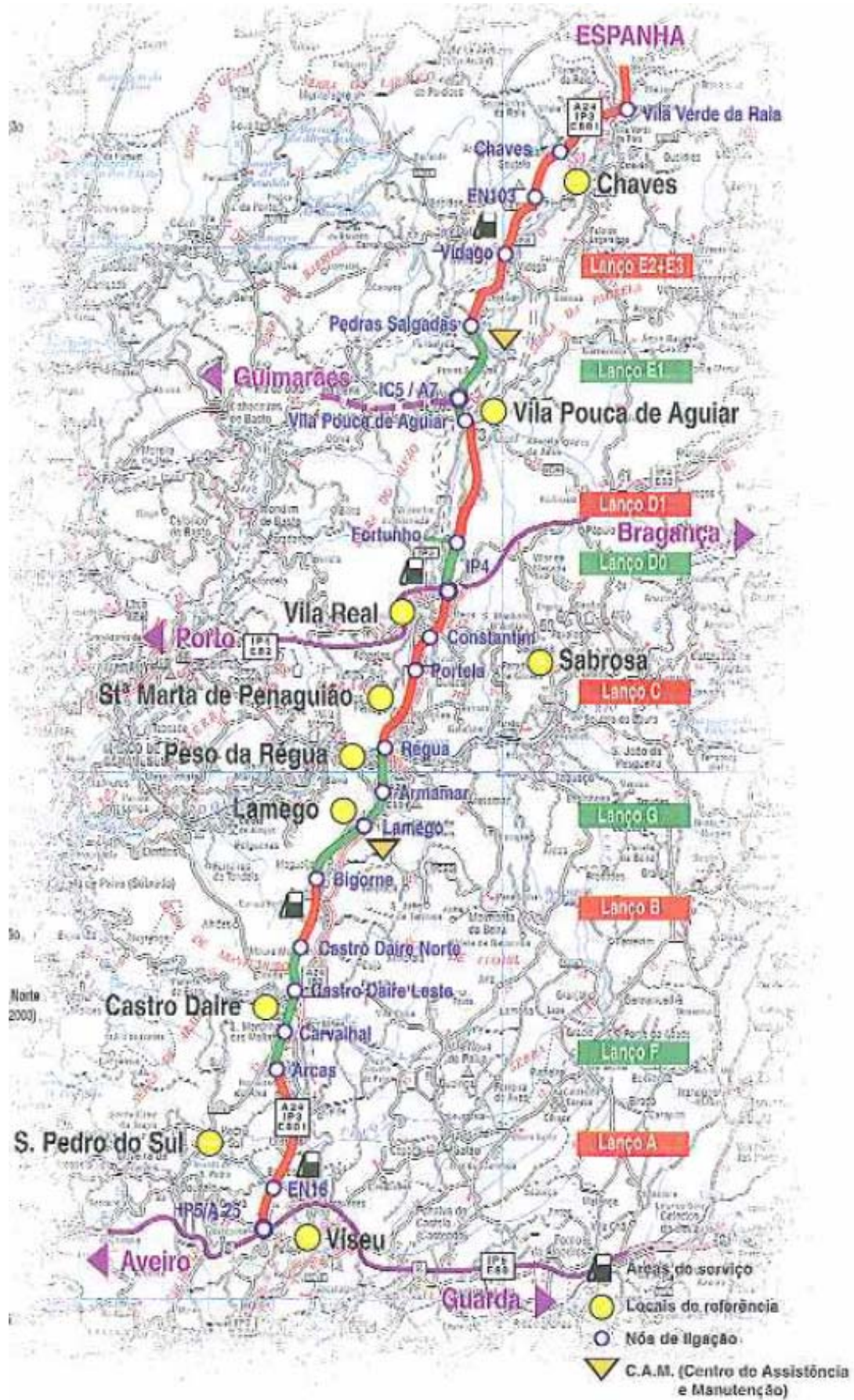


Figure 1 : Tracé de l'autoroute NORSCUT

2. LES ÉTUDES TECHNIQUES

2.1. Les études préliminaires

Une première étude préliminaire de niveau APS désignée «projecto-base-phase 1 » a été conduite en janvier 2004 par Jean Muller International (JMI).

Quatre solutions ont été étudiées par JMI :

- deux solutions à tablier en béton précontraint
 - solution 1 : « encorbellement»
 - solution 2 : « caisson poussé» + « encorbellement»
- deux solutions à tablier en ossature mixte acier-béton
 - solution 3 : « double bi poutre mixte»
 - solution 4 : « simple bi poutre large mixte»

En l'état des reconnaissances géologiques et géotechniques à ce stade du projet, les fondations pour les quatre solutions étudiées étaient toutes superficielles. De même les terrassements pour fouilles et les pistes d'accès n'étaient pas comprises dans l'estimation initiale.

Les écarts entre les différentes solutions étudiées et la solution 2 la plus compétitive étaient les suivants :

Solution 1 « caisson béton encorbellement	+12%
Solution 2 « caisson béton poussé +encorbellement »	0%
Solution 3 « bi-poutres mixte/deux tabliers »	+ 1%
Solution 4 « bi-poutre mixte/mono tablier large »	+0,5%

A l'issue de cette étude comparative, NORINTER décida de retenir pour la suite des travaux la solution 2 du « projecto-base-phase 1 » parmi les quatre solutions proposées.

Préalablement au démarrage des études d'exécution, Norinter a confié au Bureau d'Etudes Jean Muller International une mission d'avis technique de la solution tablier en béton précontraint redimensionné par le Bureau d'Etudes Armando Rito Lda lors de l'étude d'avant-projet détaillé ou « projecto-base-phase 2 ».

La solution développée dans le « projecto-base-phase 2 » correspond à la juxtaposition de deux types de structures précédemment réalisées avec succès pour le tronçon IP3 de l'autoroute NORSCUT :

- Le viaduc du Corgo situé sur le lanço C, ouvrage à travées courantes de 145 m de portée environ construit par encorbellement successif de voussoirs coulés en place.
- Le viaduc du Vouga situé sur le lanço A, ouvrage à travées de 60 m de portée construit par le procédé du poussage.

Ce sont à chaque fois des ouvrages « à tabliers séparés » de section transversale en caisson béton précontraint.

L'avis technique JMI établi pour l'ouvrage en cours d'exploitation, sur la base des documents remis par le BE Armando Rito Lda, a porté sur :

- les données fonctionnelles : tracé en plan et profil en long ; section transversale fonctionnelle ; implantation des appuis.
- la conception générale structurelle : hypothèses de calcul ; fûts des piles ; fondations des piles ; culées ; tablier : précontrainte et aciers passifs ; cahier des charges de la campagne de reconnaissance des sols
- l'optimisation des dimensions des différentes parties d'ouvrage et les quantités de béton et de précontrainte

2.2. Les études d'exécution

Lors de la mise au point du programme des travaux, le groupement d'Entreprises Spie-Batignolles-Tamega, a proposé de réaliser les tabliers des travées d'accès de hauteur constante au Nord et Sud suivant la technique du cintre autolanceur en remplacement de la méthode de poussage pour les raisons indiquées dans le chapitre « Méthodes d'exécution ». Les études d'exécution réalisées par le BE Armando Rito Lda ont donc été menées en considérant la construction des tronçons Nord et Sud à l'aide de cintres autolanceurs, technique très largement développée au Portugal depuis de nombreuses années.

Norinter a mis en place, sous l'autorité du directeur de projet, un directeur chargé de veiller à la cohérence des choix techniques et à l'adéquation du déroulement des études d'exécution et des méthodes avec le bon avancement du chantier.



L'exercice des contrôles a été effectué à plusieurs niveaux :

- les contrôles interne et externe ont été réalisés dans le cadre de l'organisation de chaque bureau d'études d'exécution (BE Armando Rito Lda à Lisbonne et BE de Spie-Batignolles à Cergy-Pontoise).
- le contrôle extérieur de l'entreprise a été réalisé par Jean Muller international à Saint Quentin en Yvelines.

Norinter a également constitué un comité technique composé d'experts indépendants de l'Administration portugaise, d'ingénieurs de la maîtrise d'œuvre Norinter JMI, d'ingénieurs des bureaux d'Etudes Techniques et également de trois directeurs scientifiques du groupe Eiffage spécialisés dans le domaine de la géotechnique, du béton et des ouvrages d'art.

Ce comité se réunissait à intervalles réguliers (une fois par mois au début des travaux puis environ tous les deux mois ensuite). Il fournissait des avis et recommandations sur les questions techniques que lui soumettait le maître d'ouvrage.

Ce comité était piloté par Imed Ben Fredj, directeur technique de Norinter.

2.3. Les études particulières

Avant le démarrage des études d'exécution de l'ouvrage, Norinter a confié au Laboratório Nacional de Engenharia Civil (LNEC), basé à Lisbonne :

- une étude du vent sur le site de Vila Pouca afin de prévoir en particulier les mesures à adopter sur chantier pour construire l'ouvrage en toute sécurité (stabilité des piles et des grues de grande hauteur, stabilité des fléaux construits par encorbellement...)
- une étude du fluage des bétons réalisés sur le chantier afin de tenir compte le mieux possible du comportement des bétons de l'ouvrage (modules de déformation) et mettre au point l'ordre des clavages en fonction des déformées des fléaux.

Une étude était menée en parallèle en France par le Laboratoire Central des Ponts et Chaussées (LCPC) à Paris.

3. PRÉSENTATION DE L'OUVRAGE

L'ouvrage est un viaduc en béton précontraint constitué de deux tabliers parallèles indépendants de 1348 m de longueur chacun.

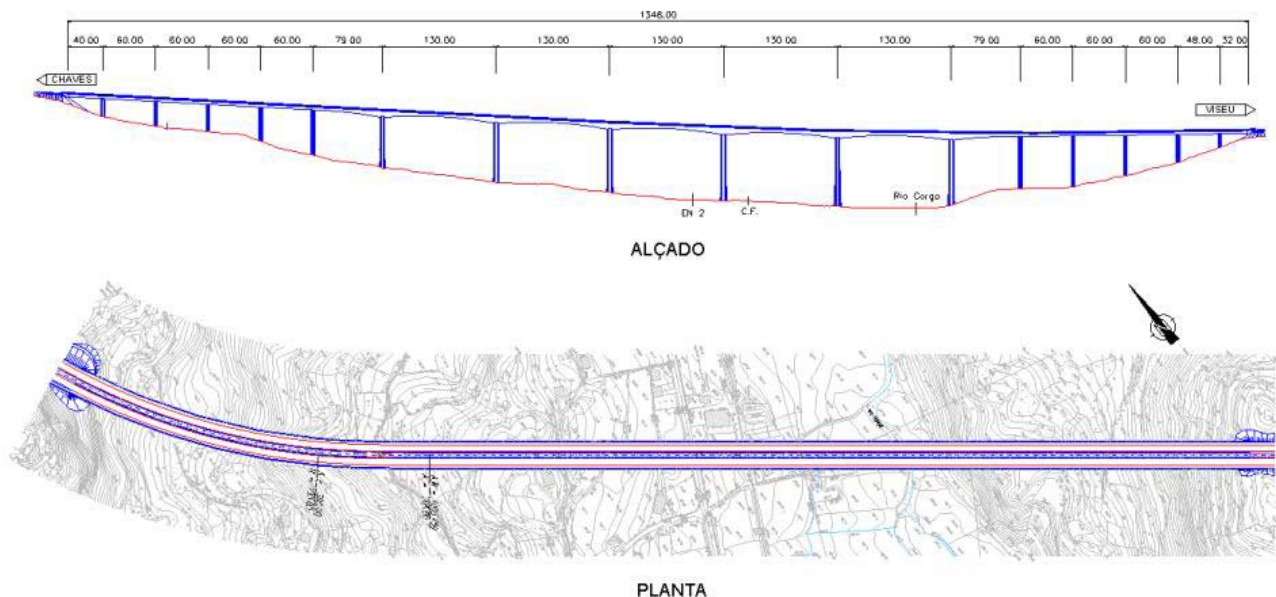


Figure 2 : Elévation et vue en plan du viaduc

Chaque tablier de 13 m de largeur repose sur seize piles et deux culées.

La répartition des travées depuis le nord vers le sud est la suivante :
40 - 4 x 60 - 79 - 5 x 130 - 79 - 3 x 60 - 48 - 32 mètres.

Chaque tablier a ainsi été découpé en trois parties en fonction du mode de construction des travées :

- Le tronçon nord qui repose sur cinq piles a été réalisé à l'aide d'un cintre auto lanceur dit « par-dessus ».
- Le tronçon central qui repose sur six piles dont la plus haute avoisine les 90 mètres a été réalisé par encorbellements successifs de voussoirs coulés en place dans des équipages mobiles de bétonnage.
- Le tronçon sud qui repose sur cinq piles a été réalisé à l'aide d'un cintre auto lanceur dit « par-dessous ».

Nous donnons brièvement ci-après, les principales caractéristiques des appuis et de leurs fondations ainsi que celles des tabliers des différents tronçons.

3.1. Fondations

Les appuis sont tous fondés superficiellement. Les semelles de fondation ont pour dimensions :

- pour les tronçons nord et sud : 12 x 10 m en plan et 2,40 m d'épaisseur
- pour le tronçon central : elles ont été réalisées en deux phases de 16x14x2,60 puis de 10x8x1,5 m.

Elles reposent directement sur un sol rocheux ou sur des arènes compactes.

3.2. Appuis

Les piles sont creuses, en forme de caisson, et elles ont toutes été réalisées au moyen de coffrages grimpants.

Les piles des tronçons nord et sud sont toutes de section constante réalisées par levées de 4,50m de hauteur chacune.

Les piles du tronçon central sont de section variable sur leur hauteur. Elles ont été réalisées par levées de 4 m de hauteur chacune.

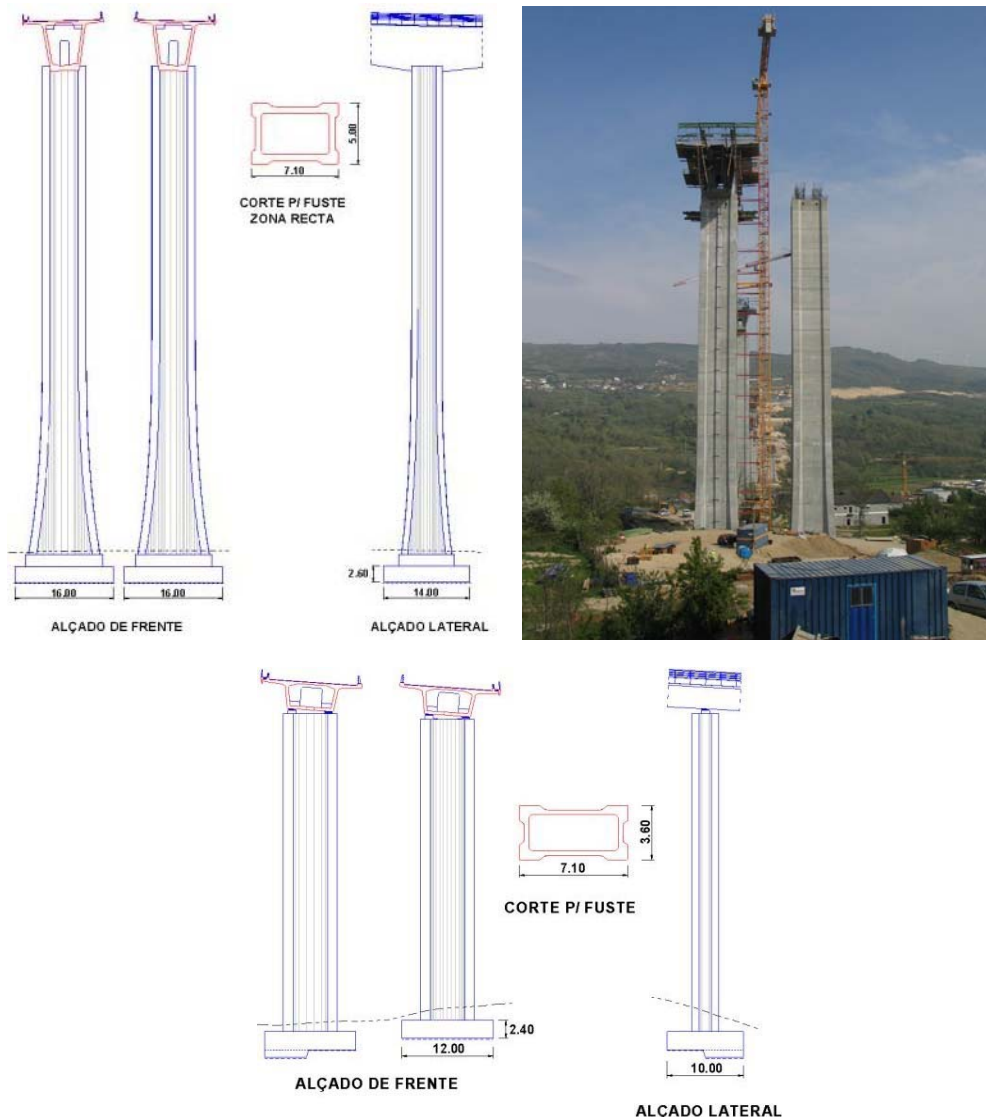


Figure 3 : Coffrages des piles



La variation est parabolique jusqu'à un niveau situé à 38,50 m de la tête de pile ; ensuite la section devient constante. Trois types différents de coffrage ont été utilisés pour les petites piles, pour les levées à section variable puis constante des grandes piles.

Le ferrailage a été réalisé sur place et les différentes levées ont été bétonnées à la benne.

Contrairement au viaduc du Corgo situé sur le lanço C, il n'y a aucune précontrainte verticale dans les piles.

Les tabliers des tronçons nord et sud reposent sur chaque pile par l'intermédiaire d'appareil d'appuis spéciaux à pot d'élastomère.

Le tablier du tronçon central situé à très grande hauteur au-dessus du sol (80 m environ) est encastré sur chaque tête de pile.

Les culées de conception classique reposent sur les fondations superficielles côté Nord et côté Sud.

3.3. Tablier

Le tablier est de hauteur constante égale à 3,60 m pour les tronçons nord et sud (élancement égal à 1/16,7).

Le tablier du tronçon central construit par encorbellement est de hauteur variable paraboliquement entre 8,5 m sur pile et 3,60 m à la clé de chaque travée centrale.

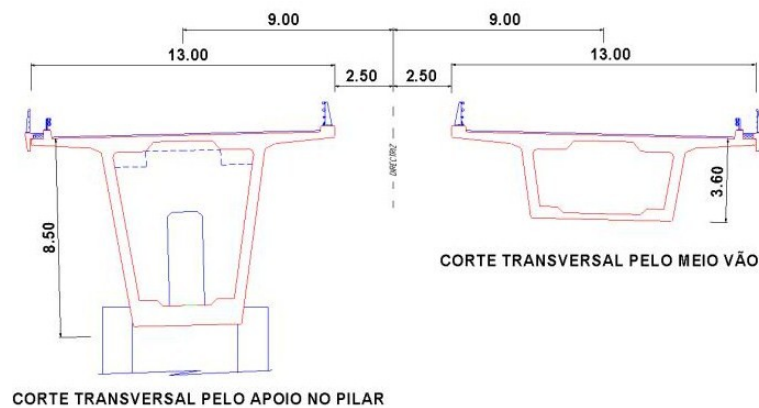


Figure 4 : Coupes transversales types du tablier

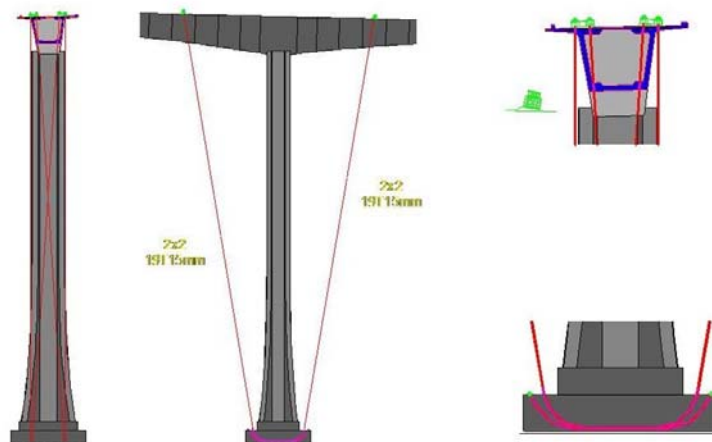
L'épaisseur des âmes est constante sur les parties construites par encorbellement (0,45 m) et pour les parties coulées sur cintre auto lanceur (0,40 m).

La précontrainte du tablier constituée exclusivement d'unités 19 et 27T15S du procédé Spie-Batignolles est entièrement intérieure au béton. Seule la précontrainte additionnelle prévue pour un renforcement éventuel du tablier à un moment donné de la vie de l'ouvrage (suite à un changement de programme fonctionnel ou pour toute autre raison le justifiant) est extérieure au béton à raison de deux câbles 19T15S par âme et par tablier (réservations dans les entretoises sur les piles P5 à P12 et déviateurs dans tous les fléaux du tronçon central).

Chaque travée de 60 m de longueur des tronçons nord et sud pèse 1350 tonnes.

Pour le tronçon central, construit par encorbellement la longueur du voussoir sur pile (VSP) est de 8 m et la longueur de chaque voussoir courant est de 5 m ce qui conduit à un voussoir de clavage de 4 m de longueur.

Le poids des voussoirs du tronçon central est variable entre 205 tonnes pour le VSP et 130 tonnes pour le voussoir situé au voisinage de la mi-travée.



Haubanage de stabilisation des piles

Pendant la construction des fléaux du tronçon central, il a été disposé un haubanage provisoire constitué de 2 câbles 19T15 par âme (soit 8 câbles au total par fléau) ancrés en partie supérieure au milieu du voussoir V4 de chaque fléau et en partie inférieure dans la semelle de fondation. Ce dispositif de haubanage provisoire a été mis en œuvre pour reprendre un déséquilibre de bétonnage du à l'effet du poids d'un voussoir bétonné avant son symétrique ou la chute d'un équipement mobile.

4. MÉTHODES D'EXÉCUTION

4.1. Les moyens mis en oeuvre

L'ouvrage présente une géométrie complexe au Nord. Démarrant en plan par un cercle de rayon 735 m, le tracé se poursuit suivant une clothoïde assurant le raccordement avec la partie droite courante. La géométrie transversale qui en résulte conduit à des pentes de 7% se réduisant ou s'inversant jusqu'à 2,5% suivant les tabliers. Ces dévers se conjuguent de plus avec une pente longitudinale de 5,3%.

La géométrie plane de la partie Sud est beaucoup plus simple avec un tracé rectiligne en plan conduisant à des dévers constants de 2,5%. Pour ce qui est du profil longitudinal, il suit un arc circulaire de rayon 9000 m jusqu'à la culée Sud.



Photo 1 : Vue d'ensemble en cours de construction

Cette particularité du tracé au Nord ne permettait pas d'envisager une solution constructive simple et applicable aux deux extrémités du tablier. Elle conduisait, au contraire, à devoir concevoir un outil complexe répondant aux exigences de la partie Nord, puis à envisager de l'utiliser pour une partie Sud qui se prêtait à un mode constructif plus simple.

C'est donc un cintre auto lanceur "par-dessus", c'est-à-dire présentant une structure porteuse située au dessus du tablier en béton, qui a été étudié et réalisé.



Cintre autolanceur côté Nord



Une telle structure permet de suivre un tracé courbe variable, mais au prix d'avancées assez lentes avec reprises multiples des points d'appui successifs intermédiaires. De plus, les charges de béton doivent être remontées à l'aide de suspentes qui deviennent gênantes lors des bétonnages. Enfin, la pente transversale variable et le tracé en courbe des coffrages compliquent notablement la réalisation. Ce cintre, réalisé par ULMA (entreprise portugaise spécialisée dans ce domaine), mesurait 130 m de longueur pour 19 m de largeur et pesait 790 tonnes équipé de ses coffrages extérieurs.

Le délai de réalisation extrêmement court imposé pour la construction de l'ensemble du viaduc (22 mois) a vite conduit à la conclusion que cet outil assez lent à manœuvrer ne pourrait pas être utilisé pour les deux extrémités de l'ouvrage. Il a donc été décidé de dissocier ces deux exécutions et de rechercher un cintre permettant de couler l'extrémité Sud. La géométrie beaucoup plus simple de cette partie du tablier a permis de retenir un cintre auto lanceur par "en dessous" appartenant à l'entreprise TAMEGA.



Cintre autolanceur côté Sud

Ces cintres présentent des poutres porteuses latérales qui, après avoir été écartées, peuvent glisser longitudinalement sur des consoles supports fixées aux piles (photo et schéma). Ce type d'outil offre une surface dégagée qui facilite la mise en place des ferrillages et le bétonnage. Le cintre utilisé mesurait également 130 m de longueur mais ne pesait que 660 tonnes équipé de ses coffrages extérieurs.

Le poids de ces cintres est cependant à comparer avec le poids d'une travée de 60 mètres soit 1350 tonnes.



Equipage mobile de bétonnage

Entre ces deux extrémités, la partie courante du viaduc présente un tracé rectiligne en plan et seul le profil en long est variable. Cette partie se prêtait donc parfaitement à une réalisation par encorbellements successifs de voussoirs coulés en place.

Les équipages mobiles utilisés ont été des équipages suspendus, de pratique courante au Portugal. Permettant de réaliser des voussoirs de 5 m de longueur à raison d'un par période de cinq jours ouvrables, leur productivité est assez similaire aux outils pratiqués en France. De nombreux équipages de ce type sont disponibles dans le pays et les exigences de délais, qui ont conduit à devoir en mobiliser jusqu'à six paires simultanément, ont imposé le recours à ce type d'outils. Leur fonctionnement s'est avéré être parfaitement satisfaisant.

Une grue par pile de 12 tonnes de capacité complète le parc de matériel du chantier.

Ce sont encore ces délais extrêmement courts qui ont conduit à devoir bétonner les deux premières travées du deuxième tablier au Nord à l'aide d'un cintre au sol multipliant ainsi de façon importante la diversité des techniques utilisées sur ce chantier.

4.2. Les bétonnages

Les bétons des piles étaient des bétons de classe de résistance C30/37 (S3) et ceux des tabliers de classe C40/50 (S4). Composés à base de CEM I 42,5 R associé à des cendres volantes, les montées en résistances de ces bétons étaient bien adaptées aux exigences de mise en précontrainte nécessaires pour les tabliers sans retarder l'exécution.

Les bétonnages importants des semelles ont été réalisés à la pompe. Ceux des piles à la benne à béton dont la cadence d'approvisionnement correspondait bien au rythme de coulage nécessaire à des coffrages semi-grimpants classiques simplement aménagés en partie basse pour permettre le coulage des parties élargies en pieds des piles.



Bétonnage et clavage des tabliers

Sur les parties en encorbellement, le bétonnage a été réalisé à la pompe. Celle-ci était positionnée en pied de pile et envoyait le béton dans un tube remontant le long du fût pour traverser ensuite le VSP avant de se dédoubler au niveau du hourdis supérieur du tablier. Un système de guillotine permettait alors de gérer la destination du béton pour permettre l'alimentation vers l'un ou vers l'autre des deux voussoirs en cours de bétonnage. La qualité des bétons utilisés était parfaitement adaptée à ce mode de transport, et ceci même en période chaude.

Les parties de tablier coulées sur cintres autolanceurs, dont la longueur maximale atteignait 60 m (560 m³ de béton), ont été bétonnées en utilisant deux pompes, et ceci particulièrement au niveau des âmes du caisson. La durée de ces bétonnages dépassait les 12 heures et la cadence moyenne de mise en place a pu atteindre 45 m³/h environ. La réalisation de chaque travée nécessitait une dizaine de jours en rythme de croisière.

4.3. Les aspects particuliers de la construction

Les piles ont été stabilisées par des haubans provisoires lors de la réalisation des parties en encorbellement.

Des réservations aménagées dans les semelles ont permis de mettre en place 4 câbles 19T15 par côté, câbles qui s'accrochaient sur les voussoirs N°4, aménagés à cet effet. Ces câbles étaient d'abord tendus à 20% de leur capacité



avant bétonnage de la paire de voussoirs N°7 correspondante, leur tension étant portée à 40% de leur capacité après bétonnage de la paire de voussoirs N°8.

Ces haubans étaient détendus en fin de clavage des fléaux, après avoir été utilisés pour le réglage géométrique avant et lors de ce coulage particulier. Ce clavage a été réalisé à l'aide d'un équipement spécifique assemblé au sol puis monté en position de bétonnage à l'aide de treuils. Pour maîtriser les mouvements d'extrémité des fléaux pendant le coulage et la montée en résistance du béton, un encastrement partiel était réalisé à l'aide de profilés type HEB disposés sur le hourdis supérieur du caisson ainsi que sur le hourdis inférieur, rigidifiant ainsi notablement la jonction naturellement souple des deux fléaux. De façon classique, les premières mises en tension des câbles éclisses avaient lieu alors que le béton du voussoir de clavage ne présentait encore que des niveaux de résistance assez faibles et ceci afin de limiter les effets des variations de longueur dues aux effets thermiques.



Haubanage provisoire des piles

5. CONCLUSION

Le viaduc de Vila Pouca de Aguiar a été l'occasion d'associer le savoir-faire des ingénieurs et entreprises de construction français et portugais. Pour réaliser en 22 mois ce viaduc constitué de deux tabliers parallèles de 1348 m de longueur chacun, les équipes de travaux ont organisé ce chantier de pont comme un creusement de tunnel sur trois fronts simultanés en fonction des méthodes de construction du tablier.

Une véritable prouesse technique pour un ouvrage où il n'y a eu aucune préfabrication des cages d'armatures.

6. PRINCIPAUX INTERVENANTS

Maître d'ouvrage :	NORSCUT Concessionnaire (Eiffage 50%)
Maître d'œuvre :	NORINTER (filiale 100% Eiffage)
Constructeur :	Groupeement d'entreprises SPIE-BATIGNOLLES/TAMEGA
Etudes de conception et d'exécution :	Bureaux d'Etudes Armando Rito Lda
Contrôle des études d'exécution :	Bureau d'Etudes JMI (Jean Muller International)

Comité technique (Experts du maître d'ouvrage)

- Prof. C. Pereira CEGE
- Prof. A. Rito A. Rito Lda
- I. Ben Fredj NORINTER
- M. Guérinet Eiffage Construction
- P. Vézole Eiffage Construction
- C. Servant Eiffage Travaux Publics
- JM. Tanis JMI

7. PRINCIPALES QUANTITÉS

- Fondations sur semelles
 - Bétons 15 500 m³
 - Aciers passifs 835 tonnes
- Culées
 - Bétons 1 250 m³
 - Aciers passifs 110 tonnes
- Piles
 - Bétons 20 100 m³
 - Aciers passifs 2 550 tonnes
- Tablier
 - Bétons 31 600 m³
 - Aciers passifs 4 700 tonnes
 - Précontraintes 1 300 tonnes



Vue d'ensemble en cours de construction